جيم باجوت

الواقع الكمي

رحلة البحث عن المعنى الواقعي لميكانيكا الكم

لعبة النظريات

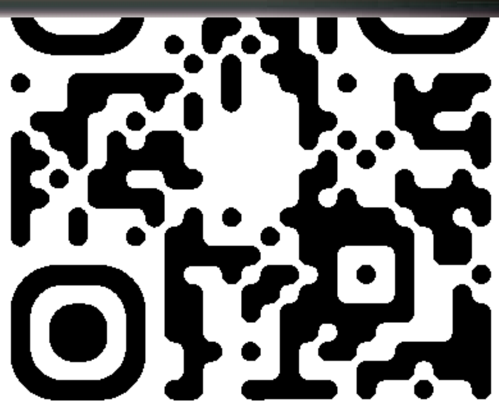




ترجمة: أحمد سمير سعد

تتوفر نسخة بجودة أعلى
في قناة مكتبة على تلجرام
خاصة للرسومات





لن ننسى تشرين 23

لن ننسى غزة والشهداء

الواقع الكمي

جيم باجوت

- المؤلف: جيم باجوت
- العنوان: الواقع الكمي - رحلة البحث عن المعنى الواقعي لميكانيكا الكم - لعبة النظريات
- ترجمة: أحمد سمير سعد
- الطبعة: الأولى 2023
- تصميم الغلاف: عمرو الكفراوي
- مستشار النشر: سوسن بشير
- المدير العام: مصطفى الشيخ





رقم الإيداع:
٢٠٢٢ / ١٤٢٧٤
الترقيم الدولي: ISBN
978 - 977-765 - 341 - 1

Afaq Bookshop & Publishing House

1 Kareem El Dawla st. - From Mahmoud Basiuny st. Talaat Harb
CAIRO – EGYPT - Tel: 00202 25778743 - 00202 25779803 Mobile: +202-01111602787
E-mail:afaqbooks@yahoo.com – www.afaqbooks.com

١ شارع كريم الدولة– من شارع محمود بسيوني – ميدان طلعت حرب– القاهرة – جمهورية مصر العربية
ت: ٢٥٧٧٨٧٤٣ ٠٠٢٠٢ – ٢٥٧٧٩٨٠٣ ٠٠٢٠٢ – موبايل: ٠١١١١٦٠٢٧٨٧

مكتبة | 1614

جيم باجوت

الواقع الكمي

رحلة البحث عن المعنى الواقعي لميكانيكا الكمِّ - لعبة النظريات

ترجمة

أحمد سمير سعد

آفاق للنشر والتوزيع

بطاقة الفهرسة

باجوت، جيم

الواقع الكمي: جيم باجوت

رحلة البحث عن المعنى الواقعي لميكانيكا الكم - لعبة النظريات

ترجمة: أحمد سمير سعد



2 – العنوان

هذه ترجمة كتاب:

Quantum Reality:

The Quest for the Real Meaning of Quantum Mechanics - a Game of Theories

By: Jim Baggott

إلى يان ميلس Ian Mills

الذي علَّمني الكثير للغاية عن ميكانيكا الكمِّ.



المحتويات

عن المؤلف ٩

مقدمة المترجم ١١

تمهيد ١٥

استهلال: لماذا لم يخبرني أحدٌ بهذا كله من قبل؟ ٢٣

الجزء الأول - قواعد اللعبة

١ - الدليل الكامل إلى ميكانيكا الكم ٣١

كل ما أردت معرفته يومًا، وقليل من الأمور التي لم ترِد معرفتها ٣١

٢ - ما هو هذا الشيء المُسمَّى واقعًا بأي حالٍ؟ ٦٣

حدس الفلاسفة والعلماء وبياناتهم التجريبية ٦٣

٣ - الإبحار في بحر التمثُّل ٩٣

كيف تنجح النظريات العلمية (وأحيانًا لا تفعل) ٩٣

٤ - عندما نزل أينشتاين إلى الإفطار ١٢٩

لأنكَ لا تستطيع أن تكتب كتابًا عن ميكانيكا الكم
من دون فصل عن مناظرة بور وأينشتاين ١٢٩

الجزء الثاني - ممارسة اللعبة

٥ - ميكانيكا الكم مكتملة لذا اخرس وقُم بالحسابات ١٦١

المشهد من سيلا: إرث كوبنهاجن وميكانيكا الكم العلائقية
ودور المعلومات ١٦١

٦ - ميكانيكا الكم مكتملة إلا أننا بحاجة إلى إعادة تفسير ما تقوله ١٨٩
إعادة النظر في الاحتمالية الكمية: المسلَّمات المعقولة
والتواريخ المتسقة والبايزية الكمية (الكيوبيزمية) Qbism ١٨٩
٧ - ميكانيكا الكم غير مكتملة لذلك نحن بحاجة إلى إضافة بعض الأشياء ٢١٩
التفسيرات الإحصائية المبنية على متغيرات خفية محلية ولا محلية معماة ٢١٩
٨ - ميكانيكا الكمّ غير مكتملة لذلك نحتاج إلى إضافة بعض الأشياء الأخرى ٢٥٥
الموجات الدليلية والجهود الكمية، وآليات الانهيار الفيزيائي ٢٥٥
٩ - ميكانيكا الكم غير مكتملة لأننا نحتاج إلى تضمين عقلي
(أم يجب أن يكون عقلك؟) ٢٨٧
«الأنا» الخاصة بفون نيومان وصديق ويجنر والكون التشاركي
وشبح الكم في الآلة ٢٨٧
١٠ - ميكانيكا الكم غير مكتملة لأن.. حسنًا، إنني أستسلم ٣١٥
المشهد من خاريبدس: إيفرت والعوالم المتعددة والكون المتعدد ٣١٥
تتمة: لديَّ شعورٌ سيِّئ جدًّا حيالها ٣٥٣
ملحق: فرضيات الواقعي ومسلَّمات ميكانيكا الكم ٣٦١
شكر وعرفان ٣٦٥

عن المؤلف

جيم باجوت، كاتبٌ علميٌّ حاصل على جوائز. عالِمٌ أكاديمي سابق، يعمل الآن مستشار أعمالٍ مستقلًا، إلا أنه يحتفظ باهتمامٍ واسعٍ بالعلم والفلسفة والتاريخ، كما يواصل الكتابة في هذه المواضيع في وقت فراغه، حظت كتبه السابقة بإشاداتٍ واسعة، ومن بينها الكتب التالية:

كتاب الطبخ الكمي: وصفاتٌ رياضية لأسس ميكانيكا الكمِّ.

The Quantum Cookbook: Mathematical Recipes for the Foundations of Quantum Mechanics.

المكان الكمي: الجاذبية الكمية الحلقية، والبحث عن بنية المكان والزمان والكون.

Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe.

الكتلة: رحلة البحث عن فهم للمادة ابتداء من الذرات اليونانية حتى المجالات الكمية.

Mass: The Quest to Understand Matter from Greek Atoms to Quantum Fields

الأصول: قصة الخلق العلمية.

Origins: The Scientific Story of Creation.

وداعًا للواقعية: كيف خانت فيزياء حكايات الجنيَّات البحث عن الحقيقة العلمية.

Farewell to Reality: How Fairy-tale Physics Betrays the Search for Scientific Truth

هيجز: اختراع واكتشاف «جسيم الإله».

Higgs: The Invention and Discovery of the 'God Particle'

قصة الكمِّ: تاريخ في ٤٠ ثانية.

The Quantum Story: A History in 40 Moments

الذَرِّيّة: حرب الفيزياء الأولى والتاريخ السري للقنبلة الذرية ١٩٣٩ – ١٩٤٩، وصل إلى القائمة القصيرة لميدالية دوق وستمنستر للأدب العسكري.

Atomic: The First War of Physics and the Secret History of the Atom Bomb 1939–49, short-listed for the Duke of Westminster Medal for Military Literature

دليل المبتدئ للواقع.

A Beginner's Guide to Reality

فيما وراء القياس: الفيزياء الحديثة والفلسفة ومعنى نظرية الكمِّ.

Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy, and the Meaning of Quantum Theory

التناظر التام: اكتشاف البوكمينستر فوليرين بالصدفة المحضة.

Perfect Symmetry: The Accidental Discovery of Buckminsterfullerene

معنى نظرية الكمِّ: دليل طلاب الكيمياء والفيزياء.

The Meaning of Quantum Theory: A Guide for Students of Chemistry and Physics

مقدمة المترجم

يأتي فاينمان في كتابه (معنى ذلك كله.. أفكار عالمٍ هاوٍ) على ذكر مايكل فاراداي وكتابه (التاريخ الكيميائي لشمعة)، ويشير إلى العلاقة التي استطاع فاراداي التأسيس لها بين الطاقة الكيميائية والطاقة الكهربية، كيف تحتفظ الروابط الكيميائية بكهربية من نوعٍ ما. إلا أنَّ فاينمان وجَّه اللوم إلى المقدمة التي صاحبت النسخة التي قرأها من الكتاب، إذ ركَّزت على تطبيقات ما اكتشفه فاراداي، في حين أن عظمة أي اكتشافٍ لا تنحصر أبدًا في التطبيق، بل تمتد إلى ما وراء ذلك، بل إنَّ العظمة الحقيقية لأي اكتشافٍ علميٍّ في قدرته على تغيير فهمنا للكون من أجل استيعابه والقبض عليه بطريقة أفضل.

وأظن أن هذا هو الموضوع الأساسي للكتاب الذي بين أيدينا. إن فوائد ميكانيكا الكمِّ الضخمة ثابتة بكل تأكيد، وتطبيقاتها تداخلت مع أغلب وجوه الحياة، وتحيط بنا من كل حدبٍ وصوبٍ. إلا أنه منذ ظهرت ميكانيكا الكمِّ واتضحت مخالفتها الواضحة للكثير من الأمور التي نظنُّها بدهيَّة، ضرب زلزالٌ عنيفٌ فهمنا للكون، وتشوَّشت الكثير من الحقائق التي ترسخت في وجداننا بخصوص العالم، واتضح أنها لم تكن تقف أبدًا على أي أساسٍ مكين.

هذا الكتاب هو محاولة للفهم والتفسير، محاولة لاستيعاب الحقائق الصعبة والمخاتلة التي تلقيها ميكانيكا الكمِّ في وجوهنا وتتأكد كل يوم وكل ساعة أكثر من اليوم السابق والساعة السابقة.

يمضي بنا هذا الكتاب في رحلة شيِّقة عبر مختلف التفسيرات التي حاولت فهم واستيعاب الدالة الموجية، تبدأ الرحلة من المناظرة التي انطلقت يومًا منذ ما يزيد على التسعين عامًا، التي تصارعت فيها وجهتا نظرٍ، إحداهما تحاول البحث عن تفسيرٍ واقعي، والأخرى لا يؤرقها كثيرًا الاعتقاد في تفسير لا واقعي. انحصر الصراع بين التفسيرات التي اندمجت بصورة ما في تفسير كوبنهاجن في مقابل المحاولات التفسيرية لأينشتاين وشرودنجر. ثم تتواصل الرحلة مستكشفة كل محاولات الفهم والتفسير والتنظير التي امتدَّت منذ ذلك الوقت وحتى اللحظة الحالية، وكان أبطالها أفضل العقول الفيزيائية وأكثرها براعة وإصرارًا.

إن أجمل ما يميز هذا الكتاب هو أسلوبه الرائع وسرده الشيِّق واستخدامه لمجازاتٍ مثيرة ومحفِّزة وسعة إطلاع مؤلفه وتوثيقه لكل المعلومات الواردة فيه. لقد عانى مؤلف هذا الكتاب في محاولته للفهم وهو ينقل إلينا خبرته هنا، صحيح أن نزعته المؤيدة لرأي محددٍ واضحة نوعًا ما إلا أن هذا لم يمنعه أبدًا من عرض كل الآراء في موضوعية شديدة.

لقد بدأ مؤلف هذا الكتاب دارسًا للكيمياء والفيزياء كما مارس الحياة الأكاديمية في هذين المجالين، أجرى الحسابات وألَّف الأوراق العلمية قبل أن تناديه نداهة البحث عن المعنى وهي الرحلة التي جعلتنا

نستمتع بهذا السِفر الرائع والثري والشامل إلى حدٍّ كبيرٍ، ولقد كفلت له هذه البداية -بخلاف الاطلاع الواسع- شبكة اتصالات عريضة بالكثير من العلماء المعاصرين الذي نجد أسماءهم حاضرة في المتن، وبعض ما أورده باجوت في هذا الكتاب جاء على ألسنتهم في حواراتٍ أجروها معه في حلقات نقاشٍ أو سمر أو عبر البريد الإلكتروني، أو أحيانًا في حفلاتٍ أو لقاءاتٍ عابرة.

أخيرًا، سعيدٌ جدًّا أن أرى مشروع نشر الأعمال العلمية مع آفاق وقد بدأ يتخذ شكلًا مغايرًا ويتطور. منذ بضعة أعوام ذهبتُ إلى لقاء أستاذ مصطفى الشيخ للمرة الأولى أحمل مشروعًا لترجمة كتاب (طبيعة العالم الفيزيائي) لسير آرثر إدنجتون، وأحمل كتابًا من تأليفي (حكايات لا تُروى كاملةً – التطور.. الإيثار.. الحمض النووي). قررتْ دار آفاق أن تخوض المغامرة معي وجاءت النتائج مبشِّرة نوعًا ما، نُشِر الكتابان ونُشِرت كتبٌ أخرى. كانت كل هذه الكتب من اقتراحي، وكم كان حبوري حين وجدتُ أستاذ مصطفى الشيخ يعرض عليَّ هذا الكتاب. إنه الكتاب الأول من مقترحات آفاق ليعلن المشروع عن اتخاذه منحى جديدًا وهو منحى مؤسسيٌّ بكل تأكيد، حيث يعمل الجميع ويشترك الجميع ويقترح الجميع، وترتقي الفكرة وتتبلور على النحو الأفضل. كان سبب سعادتي الثاني أنني فوجئتُ بصراحة بهذا الكتاب الرائع، وتعجَّبتُ كيف لم أصادفه من قبل، ولذلك يجب أن أشكر كذلك الأستاذ محمد فوزي الذي استطاع التنقيب والوصول إلى هذا السِفر الرائع الذي أفادني كثيرًا أنا نفسي على المستوى الشخصي، والذي عمل على تضفير الكثير من

المعارف في بنية واضحة سهلة شاملة، سوف تفيد بالتأكيد كلَّ مشغولٍ بالأمر، وتوفِّر عليه الكثير، وربما تدفعه إلى اتخاذ جانب في خضم هذا الصراع الفكري الثري الرائع.

مرة أخرى أشكر دار آفاق وكل القائمين عليها الذين يعملون بجدٍّ وإخلاص ومثابرة وحِرفية شديدة، وأخصُّ بالشكر أستاذ مصطفى الشيخ وأستاذة سوسن بشير وأستاذ محمد فوزي.

أحمد سمير سعد

فبراير ٢٠٢٢

تمهيد

أعرف سبب وجودك هنا.

تعرف أن ميكانيكا الكمِّ نظرية علمية ناجحة بدرجة تفوق الوصف، يعتمد عليها الكثيرُ من أنماط حياتنا المهووسة بالتقنية، ابتداء من الهواتف الذكية وحتى تدفُّق البيانات والأقمار الصناعية أيضًا. تعرف كذلك أنها نظرية مجنونة تمامًا. عرَّى اكتشافُها كلَّ تلك المفاهيم المريحة التي كنَّا قد جمعناها بخصوص الواقع الفيزيائي ونحَتها بعيدًا، كنَّا قد حصلنا على تلك المفاهيم عن طريق تفسيرنا الساذج لقوانين إسحاق نيوتن للحركة. وعلى الرغم من نجاح ميكانيكا الكم بصورة جلية تمامًا، فإنه يبدو أنها تتركنا نطارد أشباحًا وعفاريت وجسيمات هي موجات وموجات هي جسيمات، وقططًا حية وميتة معًا في الوقت نفسه، والكثير من الوقائع الشبحية فيما يبدو، ورغبة يائسة في الاستلقاء بهدوءٍ في غرفة معتمة.

رغم ذلك تمهَّل. إذا استعددنا كي نكون أكثر تحديدًا قليلًا فيما يتعلَّق بما نقصده عندما نتحدث عن «الواقع»، وإذا توخينا القليل من

الحذر عند التفكير في الكيفية التي تمثل بها نظرية علمية مثل هذا الواقع، فسوف تتلاشى كل غرابة.

إنني لا أمزح. مشهورٌ عني إلى حدٍّ ما أنني من نوع الرفاق الذين قد تجدهم في المطبخ في الحفلات، ذلك النوع الذي يفسد المرح كله، مفجرًا كل فقاعات الغموض المثيرة والخرافات العصرية (تلك الأمور التي يُطلِق عليها الأمريكيون أحيانًا woo)، وأفعل ذلك عن طريق التشكُّك البارد وإجراء الحسابات العقلانية. إنني سبوك ولست كيرك (أو مكوي)[١]. لقد لقَّبتني إحدى المعلقات مؤخرًا ب «العاقل حد الكآبة»[٢]. وهي شارة، أسعد بارتدائها في فخرٍ. يمكنك شراء العديد من الكتب الشائعة عن عجائبية وغرابة و«woo» ميكانيكا الكم، إلَّا أن هذا الكتاب ليس أحدها.

على أي حالٍ ليس هذا سبب وجودك هنا.

والآن فلنكن واضحين تمامًا، إن كتابًا يقول: «صدقًا، ما من غرابة أو غموض» لن يكون مملًّا وغير مثير فقط (وذلك بغض النظر عن مدى الجودة التي كُتب بها)، بل سوف يكون غير صحيحٍ أبدًا كذلك. نستطيع أن نُخلِّص أنفسنا بالتأكيد من كل غرابة تكتنف ميكانيكا الكمِّ، إلا أن

---

(١) شخصيات من عالم ستار تريك star trek الشهير الذي ظهر في العديد من المسلسلات والأفلام الأمريكية. (المترجم).

(٢) هي عالمة الفيزياء النظرية سابين هوسينفيلدر Sabine Hossenfelder، مشيرة إلى كتابي (وداعًا للواقعية: كيف خانت فيزياء حكايات الجنيَّات البحث عن الحقيقة العلمية Farewell to reality: How Fairy Tales Physics Betray the Search for Scientific Truth)، وذلك في تغريدة يعود تاريخها إلى ١١ مارس ٢٠١٨.

ذلك لن يحدث إلا على حساب التخلُّص من كل أمل في تعميق فهمنا للطبيعة. علينا الرضا باستخدام تصور الكم ببساطة باعتباره وسيلة لإجراء الحسابات والقيام بتنبؤات، وعلينا مقاومة إغراء التساؤل عن: كيفية قيام الطبيعة بذلك بالفعل؟ وهنالك تكمن المعضلة: إذ إنه ما جدوى النظرية العلمية إذا لم تعيننا على فهم العالَم الفيزيائي؟

دعنا لا نقع أسرى أي توهُّم. إن الخيار الذي نحن بصدده خيارٌ فلسفي. ما من شيء خاطئ علميًّا على الإطلاق في التفسير العاقل حد الكآبة لميكانيكا الكم، ذلك التفسير الذي لا ينضوي على أي غرابة. أما إذا اخترنا بدلًا من ذلك شد الخيط السائب، يصير من المحتم علينا أن نُرغَم على أخذ تصور الكم على محمله الظاهري، وتفسير مفاهيمه بحَرفية أكبر. مفاجأة، مفاجأة. يتفكَّك النسيج ويمدُّنا بكل تلك الأشياء عن عالم الكمِّ التي نجدها محيرة تمامًا، ونعود من جديد من حيث بدأنا.

إن غاية أملي في هذا الكتاب ألَّا أفسد عليك مرحكَ، بل أن أحاول تفسير ما يتعلق بميكانيكا الكم، ويدفعنا إلى مواجهة هذا النوع من الخيارات، وتوضيح السبب وراء أن لهذه الأمور طبيعة فلسفية صرفة. يسفر القيام بخياراتٍ مختلفة عن تفسيراتٍ مختلفة، بل قد يسفر عن تعديلاتٍ في تصور الكمِّ ومفاهيمه، وهو ما أطلق عليه اسم لعبة النظريات (مع الإقرار بفضل جورج رايموند ريتشارد مارتن[1] بخصوص هذه التسمية).



(١) مؤلف الرواية الشهيرة (لعبة العروش). (المترجم)

يبدأ الجزء الأول بملخصٍ سريعٍ لكل شيء تحتاج إلى معرفته عن ميكانيكا الكمِّ، ومن المأمول أن يُعدَّك لِمَا سوف يأتي لاحقًا. بعد ذلك سوف أحدِّثك عن قواعد اللعبة القائمة على فهم برجماتي للمقصود «بالواقع» إلا أنه فَهمٌ عقلاني تمامًا. كما سوف أحدِّثكَ عن تلك الأشياء التي نأمل الإلمام بها عن طريق التمثُّل العلمي للواقع. يتقصَّى الجزء الأول الجدلَ العظيم الذي قام بين ألبرت أينشتاين ونيلز بور في أواخر عشرينيات وأوائل ثلاثينيات القرن العشرين، ونشأة تفسير كوبنهاجن اللا واقعي، ذلك التفسير الذي صنع المشهد على نحوٍ مبهرٍ.

ثم نمضي نحو الجزء الثاني، حيث ننظر في أمر مختلف محاولات ممارسة اللعبة، ابتداء بإرث كوبنهاجن، مرورًا بميكانيكا الكمِّ العلائقية، انتهاء إلى التفسيرات القائمة على «المعلومات» الكمية. سوف ننظر في أمر محاولات إعادة تعريف الاحتمالية الكمية عن طريق إعادة صياغة مسلَّمات ميكانيكا الكمِّ، وطرح مفهوم التواريخ المتسقة والبايزية الكمية. ثم نُحوِّل انتباهنا صوب التفسيرات الواقعية القائمة على فكرة أن ميكانيكا الكمِّ هي نظرية إحصائية. تتضمن تلك التفسيرات نظريات المتغير الخفي للتنوعات المحلية (لا متساوية بيل Bell's inequality) والمتغير الخفي للتنوعات اللا محلية «المعماة» (لا متساوية ليجيت Leggett's inequality).

تجمَّعت على مدار أربعين عامًا المنقضية أدلَّة تجريبية، تنهض مخالِفة بشدة المتغيرات الخفية المحلية والمتغيرات الخفية المعماة

اللا محلية. لذلك تحوَّلنا صوب تفسيراتٍ تقوم على متغيرات خفية لا محلية (على غرار ما يُدعى نظريات «الموجة الدليلية» pilot wave)، أو حاولنا حل المشكلات المرتبطة «بانهيار الدالة الموجية» عن طريق طرح آليات فيزيائية جديدة، تتضمَّن دورًا محتملًا للوعي البشري. انتهينا إلى مفهوم يرى الدالة الموجية واقعية، لكنها لا تنهار، وهو ما يقود إلى العوالم المتعددة والكون المتعدد.

إذا أقحمتني في هذه الأمور، فسوف أخرج من كل هذا بتشبيه أو بمجازٍ خيالي للغاية بلا شكٍّ[1]، يقوم على اعتقاد في أن نظريات اللعبة تتضمن الإبحار «بسفينة العلم» في «بحر التمثل» المحفوف بالمخاطر. نعم، من الواضح أنني قد قرأتُ بالفعل الكثيرَ للغاية من الروايات الخيالية.

نبحر بالسفينة ذهابًا وإيابًا بين نوعيْن من الشواطئ. شواطئ الواقع الميتافيزيقي السهلة الرملية المرحِّبة على نحوٍ خادعٍ، وشواطئ الواقع التجريبي الوعرة الصخرية غير المضيافة غالبًا. يشكِّل النوع الأول

(١) عكفت على تطوير هذا المجاز لبعض الوقت. جئت على ذكره في حديث قصير لي حول طبيعة الواقع الكمي، كان في يونيو ٢٠١٧ – انظر: https://www.youtube.com/watch?v=VGR68Zl1k8w& . كما جئت على ذكره في كتابي: Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe الذي نشرته مطابع جامعة أكسفورد في عام ٢٠١٨ وكذلك في Jim Baggott, 'The Impossibly Stubborn Question at the Heart of Quantum Mechanics', Prospect, 2 August 2018, https://www.prospectmagazine.co.uk/science-andtechnology/the-impossiblystubborn-question-at-the-heart-ofquantum-mechanics.

خيالاتنا المجرَّدة وإبداعنا المنحرر وقيمنا الشخصية وأحكامنا المسبقة وصنوفًا عديدة من الأشياء المبتذلة تمامًا أحيانًا، تلك الأشياء التي نُجبَر على قبولها من دون برهان من أجل ممارسة أي شكلٍ من أشكال العلم على الإطلاق. تُترجَم هذه الأشياء إلى واحد أو أكثر من التحيُّزات الميتافيزيقية المسبقة، تلك التحيُّزات التي تلخِّص الكيفية التي نتمثَّل بها ما يجب أن يكون عليه الواقع أو الكيفية التي نصل بها إلى إيمان فيما يجب أن يكون عليه الواقع. لا تدعم هذه المعتقدات أي أدلة تجريبية وهو ما يرجع إلى طبيعتها. هكذا يمكنك التفكير في هذه التحيُّزات المسبقة باعتبارها بديهياتٍ أو حتى نصوصًا إيمانية -إذا كنتَ تحبِّذ ذلك- مرددًا أحد الاقتباسات المفضَّلة لديَّ وهو اقتباس من أينشتاين: «لا أملك اصطلاحًا أفضل من كلمة «مُعتقَد» للتعبير عن هذه الثقة بطبيعة الواقع المنطقية العقلانية والثقة بيسر وصول الاستدلال العقلي إليه بدرجة ما»[1].

أُشير إلى خطرين مهلكين في داخل البحر. أشير إلى مياه سيلا الضحلة الصخرية الواقعة بالقرب من شواطئ الواقع التجريبي، إنها أداتية فارغة بالكاد، مرضية تجريبيًّا تمامًا، إلا أنها تفتقر إلى أي تبصُّر أو فهم فيزيائي واقعي. وأشير إلى خاريبدس الواقعة بالقرب من شواطئ الواقع الميتافيزيقي،

(1) Albert Einstein, quoted in Maurice Solovine, Albert Einstein: Lettres à Maurice Solovine, Gauthier-Villars, Paris, 1956. This quote is reproduced in Arthur Fine, The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory, 2nd edition (University of Chicago Press, Chicago, 1986), p. 110.

إنها دوامة تتشكَّل من هراء ميتافيزيقي جامحٍ بلا قيدٍ. ويتمثَّل التحدي الذي يواجه واضع النظرية في اكتشاف ممرٍّ آمن خلال بحر التمثل[1].

في هذا الكتاب (الواقع الكمي) أود أن أوضح لماذا ثبت أن هذا الأمر صعبٌ إلى أقصى حدٍّ، ولماذا يخالجني شعورٌ سيِّئ للغاية حياله.

لذلك، مرحبًا بكَ. أنتَ هنا لأنك تريد بعض الإجابات. من فضلك، اجلس واسترح، وسوف أذهب لتشغيل الغلَّاية وإعداد المشروبات الساخنة.

* * *

(١) ذُكِرت سيلا في أوديسا هوميروس، وتقول الأسطورة إنها حورية مُسِخت وحشًا، وهي تعيش على صخرة في مضايق (مسينا) بين إيطاليا وصقلية، وخاريبدس هو وحش آخر يعيش تحت صخرة في المكان نفسه. (المترجم).

استهلال

لماذا لم يخبرني أحدٌ بهذا كله من قبل؟

التقيتُ ميكانيكا الكمِّ للمرة الأولى عندما كنتُ أدرس من أجل نيل درجة البكالوريوس في الكيمياء، كان ذلك في أول فصولي الدراسية على الإطلاق في مدينة مانشستر الضبابية الكئيبة، بإنجلترا، في خريف عام ١٩٧٥.

وعندما أعود بالذاكرة، لا أجد ما يدعو إلى الدهشة من أن كل الطلاب في الصف (بمن فيهم أنا نفسي) قد تحيَّروا تمامًا جراء ما تعلَّمناه. لم نكن جميعًا حتى تلك اللحظة على دراية بوجود أي شيء يمكن أن نتعلَّمه عن العالَم الفيزيائي أبعد من الاتصالية الناعمة ويقين ميكانيكا نيوتن التي تعمل مثل الساعة ولا ترحم، كنَّا هانئين بذلك.

اقتصر فهمنا للذرة على «النموذج الكوكبي» المرتبط باسميْ الفيزيائيين نيلز بور وإرنست رذرفورد. إذا كنَّا قد تدبَّرنا فيه يومًا (ويمكنني أن أخبرك أننا لم نقم بذلك قطُّ)، كنَّا لنفترض أن النظريات الكلاسيكية التي نستخدمها من أجل وصف الكواكب التي تدور حول الشمس قد تُمدَّد ببساطة لوصف الكرات الصغيرة للمادة المشحونة

كهربيًّا التي تدور حول النواة المركزية للذرة. نعم، القوى مختلفة، لكن النتائج سوف تكون هي نفسها إلى حدٍّ كبيرٍ بالتأكيد.

إلا أنهم يخبروننا الآن أن فيزياء الذرات والجزيئات محكومة بمجموعة من القوانين المختلفة للغاية، ويجب على الكيميائيين أيضًا قبول ذلك. لم نتجهز لذلك. تحتم علينا أن نلوك في محاضرتنا الأولى اكتشاف ماكس بلانك للكم، وفرضية أينشتاين عن «كمات الضوء» ونظرية بور الكمية للذرة وثنائية دي برولي للموجة والجسيم[١] والميكانيكا الموجية لإرفين شرودنجر ومبدأ عدم اليقين لفيرنر هايزنبرج.

ظننتُ أن رأسي توشك على الانفجار.

إن الميكانيكا هي ذلك الفرع من الفيزياء المعني بتلك الأشياء التي تتحرك، كيف تفعل ذلك ولماذا، وهي محكومة بمعادلة رياضية من معادلات الحركة أو بأكثر من معادلة. أدركتُ بعد فوات الأوان أن مشكلتنا نشأت نتيجة أن تطور فَهمنا للميكانيكا قد توقف عند نسخة الكتب المدرسية لنيوتن. لم نُدرَّب كي نصير فيزيائيين ولذلك افتقر تعليمُنا إلى إعادة الصياغة الدقيقة للميكانيكا الكلاسيكية، أولًا على يد جوزيف لويس لاجرانج في القرن الثامن عشر، ثم على يد ويليام روان هاملتون في القرن التاسع عشر. لم يكن المقصود من إعادة الصياغة تلك

(١) بعد أكثر من أربعين عامًا لا يزال من الممكن أن أسمع من يحاضرني وهو يشير إلى أمرٍ جانبي، ألا وهو أن دي برولي تُنطق «دي بروي».

تعديل قوانين نيوتن من حيث استعمال كميات مختلفة (على غرار الطاقة التي تحل محل قوة نيوتن الميكانيكية). لقد قام هاميلتون على وجه الخصوص بتدقيق وتوسعة الهيكل الكلاسيكي ونتائجه بشكلٍ عظيمٍ، وما ندعوها ميكانيكا هاملتون توسع من عدد الحالات التي يمكن تطبيق النظرية عليها.

لذلك لم يكن علينا فقط أن نجابه ذلك الشيء غير المعقول الذي يدعونه دالة الكم الموجية، بل توجَّب علينا كذلك مجابهة تحدٍّ آخر، إذ كان علينا كتابة شيء يُدعى «هاملتوني» لوصف نظام فيزيائي أو حالة معينة، على غرار مدار إلكترون في ذرة أو تذبذبات رابطة كيميائية تمسك بذرتين معًا، كل ذلك من دون أن نفهم فعليًا من أين جاء أيٌّ من هذين الشيئين[1].

وبالرغم من أنني لم أرتكب أي خطأ، فإنني كنتُ مكبّلًا تمامًا. ملأتُ دفاتري بمعادلات بدت... جيدة، بدت جميلة. ظللتُ لا أفهم فعليًا ما تعنيه، لكنني تعلمتُ استعمال ميكانيكا الكم على أفضل نحو ممكن ونحيتُ جانبًا أيَّ تحفظات. مضيتُ صوب استكمال دراستي من أجل الحصول على درجة الدكتوراه من جامعة أكسفورد، ثم أمضيتُ

(١) كتبتُ كتابًا متخصصًا اسمه «كتاب الطبخ الكمي: وصفات رياضية لأسس ميكانيكا الكم The Quantum Cookbook: Mathematical Recipes for the Foundations of Quantum Mechanics»، وهو مناسب للقراء الذين يمتلكون خلفية في علوم الفيزياء وبعض المهارات الرياضية. نشرته مطابع جامعة أكسفورد في عام ٢٠٢٠، وأعتبره «رفيقًا» لهذا الكتاب. إنه كتاب كنتُ لأعتبره مفيدًا بالفعل عندما كنتُ في الثامنة عشرة.

عامين في أبحاث ما بعد الدكتوراه في أكسفورد وفي جامعة ستانفورد بكاليفورنيا، وذلك قبل أن أعود إلى إنجلترا كي أتقلَّد منصب محاضر في الكيمياء في جامعة ريدينج. وعلى الرغم من أنني لم أوهب أبدًا أي مهارة رياضية عظيمة، فإنني تعلمتُ قدرًا أكبر بكثيرٍ عن ميكانيكا الكم من يان ميلس، وهو بروفيسور متخصص في التحليل الطيفي الكيميائي في قسمي، امتلأتُ بعضَ الفخر بنشر زوجين من الأوراق البحثية حول نظرية كم التذبذبات الجزيئية عالية الطاقة.

وبعد ذلك في عام ١٩٨٧ بينما كنتُ أعمل لشهرين باحثًا زائرًا في جامعة ويسكونسن - ماديسون وقعتُ على مقالٍ ألقى بي إلى الحضيض، كتبه ديفيد ميرمين[1] N. David Mermin، كان يتحدث عن شيء يُدعى «تجربة أينشتاين - بودولسكي - روزن الفكرية» يعود تاريخها إلى عام ١٩٣٥، كما يأتي المقال على ذكر بعض التجارب المعملية التي تتقصَّى طبيعة الواقع الكمي، وهي تجارب أجراها آلان أسبكت Alain Aspect وزملاؤه في عام ١٩٨٢.

شعرتُ بالحرج، لقد وصلتُ إلى هذا متأخرًا تمامًا بالفعل. **لماذا لم يخبرني أحدٌ بهذا كلِّه من قبل؟**

لقد سمحتُ لقدراتي (المتواضعة) في استخدام ميكانيكا الكم أن تخدعني وتدفعني إلى الظن أنني فهمتها بالفعل. كشف مقال

(١) N. David Mermin, 'A Bolt from the Blue: The E-P-R Paradox', in A. P. French and P. J. Kennedy (eds), Niels Bohr: A Centenary Volume (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1985), pp. 141–7.

ميرمين عن أنني لم أفهمها حقًّا، وكان إشارة البداية إلى رحلة شخصية استمرَّت ثلاثين عامًا. إنني الآن أتباهى بامتلاكي العديد من الأرفف التي تفيض بكتبٍ عن ميكانيكا الكم وتاريخ العلم وفلسفته بالإضافة إلى لابتوب مملوء بالمقالات المُحمَّلة من الإنترنت. كتبتُ القليل من الكتب بنفسي، نُشِر أولها في عام ١٩٩٢.

يمكنني أن أؤكد في سعادة أنني ما زلتُ لا أفهم ميكانيكا الكم[١]، مثلي في ذلك كمثل الفيزيائي صاحب الكاريزما ريتشارد فاينمان، لكنني أظن أنني أتفهَّم السبب الآن.

* * *

(١) In The Character of Physical Law (MIT Press, Cambridge, MA, 1967) on p. 129 Richard Feynman famously wrote: 'I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.'

الجزء الأول

قواعد اللعبة

الفصل الأول

الدليل الكامل إلى ميكانيكا الكم

(موجز)

كل ما أردت معرفته يومًا، وقليل من الأمور التي لم ترِد معرفتها

ها هنا ما تعلَّمته طوال أربعين عامًا الماضية أو نحو ذلك.

الطبيعة عبارة عن تكتلات، ليست انسيابية أو متصلة

نعرف الآن أن المادة كلها مكوَّنة من ذرات. تتركب كل ذرة بدورها من إلكترونات خفيفة سالبة الشحنة «تدور في مدارات» حول نواة. تتكون النواة من بروتونات ثقيلة موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة (يتركب البروتون من كواركين علويين وكوارك سفلي، ويتركب النيوترون من كوارك واحد علوي وكواركين سفليين[1]. نجد أن الذرات متمايزة، يمكننا أن نقول إن لها «مواضع»، إن الذرات «هنا» أو «هناك»، لا يعد هذا في حد ذاته كشفًا مميزًا.

---

(١) وضعت «تدور في مدارات» بين علامتي تنصيص لأن الإلكترون لا يدور في مدارٍ حول النواة بالطريقة نفسها التي تدور بها الأرض حول الشمس، هو يقوم في الحقيقة بشيء أكثر إثارة، كما سوف نرى قريبًا.

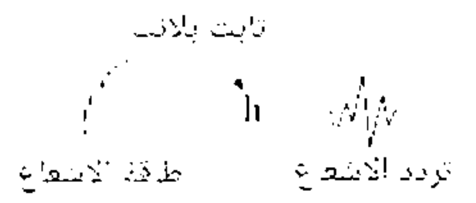
إلا أن مفهوم الذرات كان فعليًا مثار خلاف حتى نهاية القرن التاسع عشر، مع استثناء ما قالت به قلة من الفلاسفة قبل ألفي وخمسمائة عام. ففي النهاية، لماذا عليكَ أن تؤمن بوجود الذرات بينما لا يمكنكَ أن تأمل أبدًا في رؤيتها أو الحصول على أي إثباتٍ يدل عليها؟

في الحقيقة، قاد عزمٌ على دحض وجود الذرات ماكس بلانك نحو دراسة خواص وسلوك ما يُدعى بإشعاع «الجسم الأسود» المحبوس داخل أوعية أسطوانية مصنوعة من البلاتين والبورسلان (الخزف)[1]. عندما يُسخَّن مثل هذا الوعاء فإن داخله يتوهج مثل فرنٍ، مع ارتفاع الحرارة، يتسبَّب إشعاع الضوء المنبعث بالداخل في توهُّج بلون أحمر، وبرتقالي مائل إلى الأصفر وأصفر لامع وأبيض براق في النهاية. اهتم بلانك بالعثور على نظرية لوصف تنوعات نمط وشدة تردُّدات الأشعة المختلفة (أو الأطوال الموجية أو الألوان) المصاحبة لارتفاع درجة الحرارة.

تحول بلانك بسبب ما وجده في (خطوة يائسة) في عام ١٩٠٠ إلى مؤمن مخلص للذرية، إلا أن الأمر احتاج إلى قليلٍ من السنوات الأخرى حتى تنجلي الدلالة الفعلية لاكتشافه. استنتج بلانك أن جدران الوعاء تمتص وتبعث الإشعاع داخل التجويف كأنما يتركب هذا الإشعاع من شذرات منفصلة، أطلق عليها اسم كمات. تُعرف الآن المعادلة التي تلخص هذا باسم علاقة بلانك – أينشتاين:

---

(١) لا يشير «الجسم الأسود» على أي نحوٍ إلى لون جدران التجويف، بل يشير إلى الطريقة التي تمتص بها هذه الجدران الإشعاع المحبوس بالداخل وتشعُّه. يمتص جسمٌ «أسود» الإشعاع ويشعُّه «بصورة مثالية» نظريًا، أي أن الإشعاع لا يعتمد على المادة المصنوعة منها الجدران.



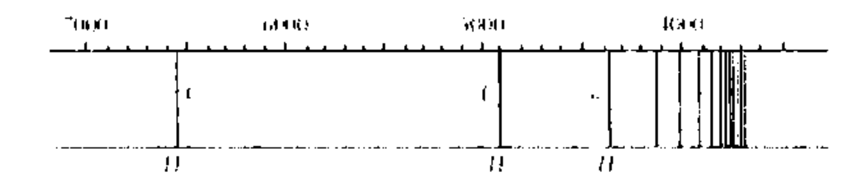
قد لا يبدو هذا عميقًا جدًّا، لكن فلتفكِّر فيه. إن تردد الإشعاع متغيرٌ بصورة متصلة وانسيابية – لا وجود لقفزاتٍ مفاجئة أو فجواتٍ في طيف ألوان قوس قزح: تتداخل الألوان من واحدٍ إلى الآخر في يُسر وسلاسة تامة بدلًا من ذلك. لو كانت الطاقة = تردد الإشعاع، فسوف يستلزم ذلك أن تكون الطاقة كذلك سلسة ومتصلة. إلا أن بلانك اكتشف غير ذلك. يمثِّل ثابت بلانك (المشار إليه بالحرف h) في حالة أي تردد معطى أصغر كمية طاقة يمكن أن يمتصَّها أو يشعَّها جسمٌ. لا يستقبل الجسم أو يصدر الطاقة بصورة متصلة وانسيابية، بل يمتصها ويشعُّها في هيئة شذرات متمايزة يحددها h بدلًا من ذلك. إن ثابت بلانك هو الإشارة الدالة على كل الأشياء الكمية.

عزا بلانك هذا السلوك في البداية إلى الطبيعة الذرية للمادة التي تشكِّل جدران الأوعية. إلا أن أينشتاين كان المُطلِق الفعلي لثورة الكمِّ، عندما اقترح في عام ١٩٠٥ –متجاوزًا الأعراف– أن الإشعاع نفسه «مكمم» يأتي في صورة شذرات متمايزة مؤطرة أو في صورة تكتلات من الطاقة. كانت هذه هي فرضية أينشتاين بخصوص «كمات الضوء»، وهي السبب وراء الإشارة إلى العلاقة المذكورة بالأعلى حاليًّا باستخدام اسميْ كلٍّ من بلانك وأينشتاين. كان محقًّا بالطبع. نعرف اليوم تكتلات طاقة الضوء باسم الفوتونات.

وعلى ذلك، لا تأتي المادة فقط في صورة تكتلات، بل يأتي الإشعاع

كذلك في صورة تكتلات. ضع المزيدَ والمزيدَ من الطاقة في إلكترون داخل ذرة وسوف «يدور» حول النواة على مسافات أبعد وأبعد في المتوسط حتى يُقتَلَع من الذرة تمامًا. إلا أنك لا تستطيع أن تزيد من هذه الطاقة بصورة متصلة وانسيابية. سوف يمتص الإلكترون الطاقة في فترات منفصلة ومتمايزة جدًّا تنتظم في الطيف الذري (انظر شكل رقم ١).

تشكِّل هذه الفترات سلَّمًا له درجات تنتظم في نمطٍ مميز. أدرك نيلز بور في عام ١٩١٣ أن هذا النمط يوصف بواحد أو أكثر من أعداد الكم، ويختلف عن السُّلَّم الفعلي في أن درجات الكم تقترب من بعضها أكثر وأكثر كلما مضت نحو طاقاتٍ أكبر وأكبر. ادفع كمية الطاقة الصحيحة تمامًا في إلكترون في ذرة، بحيث تكون كافية كي تجعله يتسلَّق من درجة إلى الدرجة التالية، وسوف يبدو مدار الإلكترون كأنما يتغير بطريقة غير متصلة، في «قفزاتٍ كمية».



شكل رقم ١: تُظهِر هذه الصورة سلسلة من الخطوط في الطيف الذري للهيدروجين، يتكوَّن الهيدروجين من بروتون مفرد، يدور حوله إلكترون مفرد. تزداد الطاقة من اليسار إلى اليمين، ويُظهِر الطيف أن الطاقة لا تُمتَص أو تُبعث بصورة متصلة، بل في كمياتٍ منفصلة متمايزة فقط. ظهر هذا الطيف في كتاب Lærebog i physic الصادر عام ١٩١٠ ومؤلفه هو كريستيان كريستيانسن، وقد درَّس لنيلز بور في جامعة كوبنهاجن. تُسجل الأطوال الموجية في الأعلى على طول الشكل بالأنجستروم (ويمثل عُشر النانومتر والنانومتر هو واحد على مليار من المتر)، ومن ضمن الأطوال الموجية المسجلة خطوط الطيف الخاصة H_α (٦٥٦,٣ نانومتر – أحمر) و H_β (٤٨٦,١ نانومتر – أزرق) و H_γ (٤٣٤,٠ نانومتر – بنفسجي) إذ نراها موضحة في جلاء.

وعلى قدر ما نعرف، ما من شيء غير مكمَّم في الواقع، وربما يتضمَّن ذلك المكان والزمن أيضًا.

الموجات جسيمات والجسيمات موجات

يتوجب عليَّ الاعتراف بأنني أعتبِر الفيزيائي الفرنسي لويس دي برولي أحد أبطالي. يبدو أنه قد أثَّر بقدرٍ ضئيلٍ في العلم عقب فوزه بجائزة نوبل في عام ١٩٢٩، إلا أن إسهامه قبل ذلك بستة أعوام كان كافيًا كي يترك علامة باقية في التاريخ الإنساني.

استُقبلت فرضية أينشتاين بخصوص كمات الضوء بتشكُّكٍ كبيرٍ عند الإعلان عنها. عندما صدرت توصية بضم أينشتاين إلى عضوية أكاديمية العلوم البروسية ذائعة الصيت، اعترف أعضاء الأكاديمية أصحاب الباع -ومن بينهم بلانك- بإسهاماته البارزة في الفيزياء، تلك الإسهامات التي تضمنت في ذلك الوقت نظرية النسبية الخاصة (سوف تأتي النظرية العامة عقب ذلك بأعوامٍ قليلة). وبقبولهم ترشيحه، كانوا على استعدادٍ لغفران زلَّاته في الحكم على الأمور: إذ إنه قد يخطئ الهدف أحيانًا في تخميناته. على سبيل المثال، فيما يتعلَّق بفرضيته عن كمات الضوء، لا يمكننا بالفعل أن ندينه كثيرًا بها، إذ إنه من غير الممكن طرح تصورات جديدة حقًّا من دون المجازفة أحيانًا، وينطبق ذلك أيضًا حتى على أكثر العلوم انضباطًا(١).

---

(١) Quoted in Abraham Pais, Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford University Press, Oxford, 1982), p. 382.

إلا أن أينشتاين في ورقته البحثية القصيرة اقترح أنه من المحتمل الحصول على دليلٍ على طبيعة الضوء الكمية عن طريق دراسة التأثير الكهروضوئي. سَلَّط ضوءًا له تردُّد وشدة محددة على سطح معدني وسوف تنقذف الإلكترونات إلى الخارج. ترتبط طاقة الموجة الكلاسيكية بسعتها – ارتفاع قممها وعمق قيعانها، فكر في الفارق بين موجة بحر تتهادى في نعومة وبين تسونامي. تنعكس هذه الطاقة على شدة الموجة أو على بريقها – إذا كنت تحبِّذ هذا التعبير. إذا كان الأمر على الصورة التي يعتقدها الجميع، وكان الضوء قابلًا للوصف باصطلاحات موجية خالصة، فمن ثم سوف تؤدي الزيادة في شدة الضوء إلى زيادة الطاقة، وعلى ذلك ينبغي لعدد الإلكترونات المنبعثة من السطح أن يزداد، كما ينبغي لطاقاتها أن تزداد بصورة انسيابية.

إلا أن هذا لم يكن ما رُصِد في التجارب الأولى. تقترح علاقة بلانك – أينشتاين أن تردُّد الضوء –وليست شدَّته– هو كل ما يهم. لن يدفع الضوء الخاطئ الإلكترونات أبدًا، مهما كانت شدته. سوف تقذف كمات الضوء (الفوتونات) ذات الطاقة الكافية فقط الإلكترونات من السطح. تؤدي زيادة شدة الضوء ببساطة إلى زيادة عدد الإلكترونات الخارجة (لا طاقة تلك الإلكترونات).

في ذلك الوقت، كان مثل هذا السلوك مخالفًا للبداهة، مع ذلك فقد تبيَّنت صحته في تجارِب لاحقة، أُجريت بعد عشر سنوات تقريبًا، وأدَّت إلى تتويج أينشتاين بجائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٢١.

كان هذا إنجازًا عظيمًا، لكنه طرح كذلك معضلة عويصة. كان ثمة برهانٌ راسخٌ جيدًا بالفعل لصالح نظرية موجية للضوء. مرِّر ضوءًا له لون مفرد خلال فتحة ضيقة أو شقٍّ، مثقوب بحسب أبعاد نسق الطول الموجي للضوء، وسوف ينضغط عبر الحواف وينحني حولها وينتشر من ورائها. «يحيد» الضوء. لو عرَّضنا لوحًا فوتوغرافيًّا لهذا الضوء عن طريق وضعه على مسافة قصيرة من الثقب، فسوف يكشف عن شريطٍ منتشرٍ بدلًا من خطٍّ رفيع له أبعاد الشق نفسه[1].

إذا ثقبتَ شقين الواحد إلى جانب الآخر، نحصل على تداخل – تكشف عنه شرائط لامعة ومعتمة متبادلة، تُدعى أهداب التداخل. عندما تنتشر الموجات من الشقين كليهما، تمضي بعضها نحو بعض، ونحصل عند موضع التقاء قمة مع قمة على قمة أكبر (وهو ما ندعوه تداخلًا بنَّاء) وعند موضع التقاء قمة مع قاع تلغي كلٌّ منهما الأخرى (تداخل هدَّام) –انظر الشكل ٢ أ– تصدر الأهداب اللامعة عن التداخل البنَّاء، وتصدر الأهداب المعتمة عن التداخل الهدَّام. لا يقتصر هذا السلوك على الضوء؛ إذ يمكن تمثيل مثل هذا التداخل الموجي بسهولة باستخدام موجات الماء. شكل ٢ ب.

إلا أن الموجات غير محددة الموضع في الأساس: إنها هنا وهناك. لا تنفي فرضية كمات الضوء لأينشتاين كل البراهين التي تؤيد خواص الضوء الشبيهة بخواص الموجة غير محددة الموضع. إذ طُرِح أن الوصف

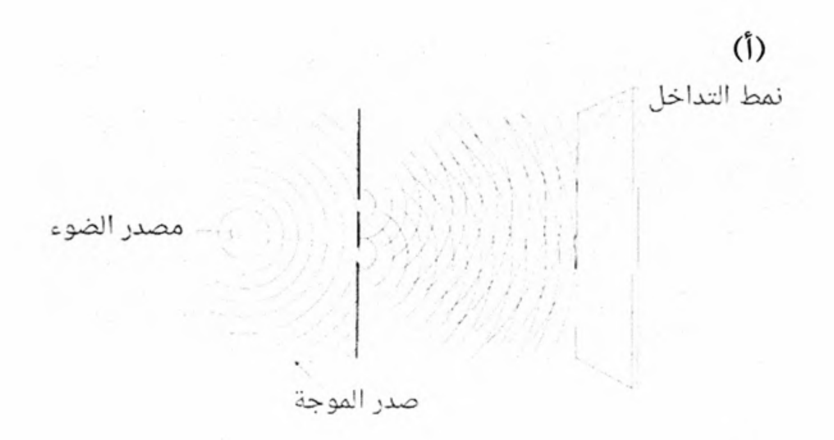
(١) مع ذلك، إذا نظرت مدققًا، فسوف ترى حواف هذا الشريط وقد كشفت عن نمطٍ حيود مميز «لأهداب» من ضوء وظلام متبادل.

الكامل يحتاج بطريقة ما إلى الأخذ في الحسبان خواص الضوء الشبيهة بخواص الجسيم محدد الموضع كذلك. كان لدى أينشتاين تصورٌ عن الكيفية التي يمكن القيام عن طريقها بذلك، وسوف نهتم بهذا الأمر في موضع لاحق من هذا الكتاب.

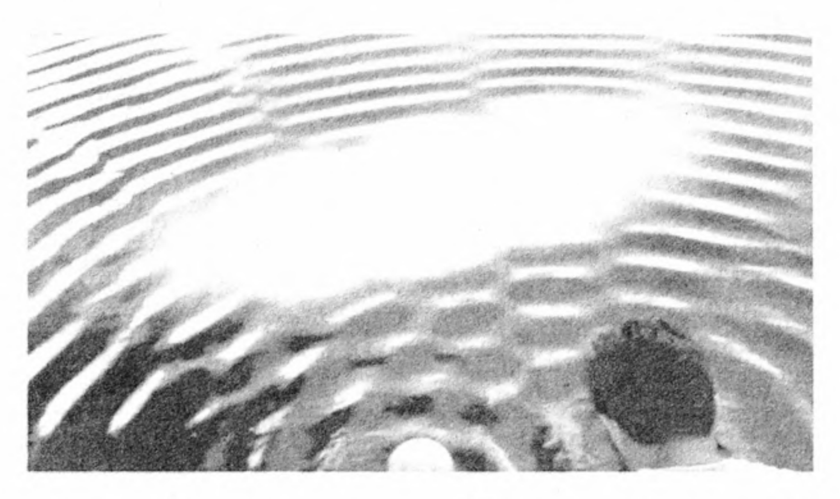
حسنًا، هكذا يعرض الضوء سلوكيات خاصة، إلا أن المادة مختلفة بالتأكيد. لعله من البدهي تمامًا محاولة الكشف عن أن الجسيمات المادية مثل الإلكترونات تتصرَّف بطريقة مشابهة للغاية لما قد نتوقعه. على سبيل المثال، نرصد مسارات واضحة لها في جهاز يُدعى الغرفة السحابية - انظر شكل ٣ أ[1]. توضح هذه الصورة مسارًا لامعًا، خلَّفه جسيم ألفا مشحون بشحنة موجبة، وجسيم ألفا هو نواة ذرة هيليوم، تتكوَّن من بروتونين ونيوترونين، كما توضح الصورة سلسلة من مسارات أقل سطوعًا، خلَّفتها إلكترونات مشحونة بشحنات سالبة، نتجت حركاتها المنحرفة عن تعريضها لمجال مغناطيسي.

---

(١) اخترع تشارلز ويلسون الغرفة السحابية، وهي تعمل على النحو التالي: يمرُّ جسيمٌ عالي الطاقة مشحون بشحنة كهربية عبر غرفة مملوءة بالبخار. وبينما يمرُّ، يزيح إلكترونات من ذرات في البخار، مخلفًا في أثره أيونات مشحونة. تتكثف قطرات الماء حول الأيونات، كاشفة خط سير الجسيم.

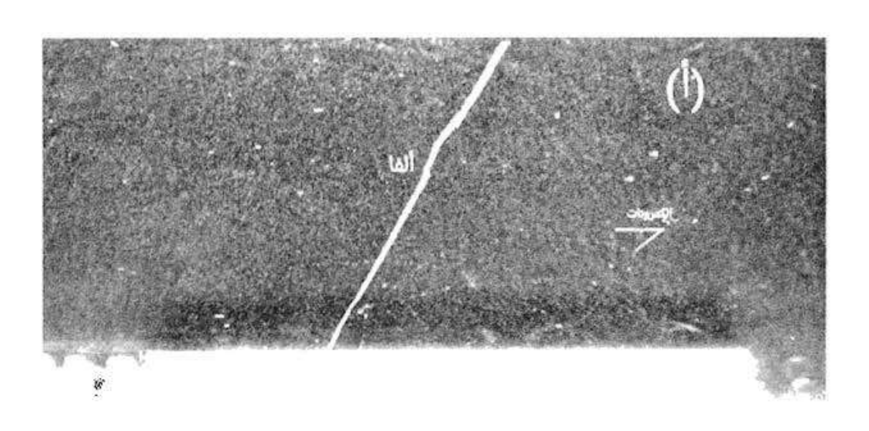


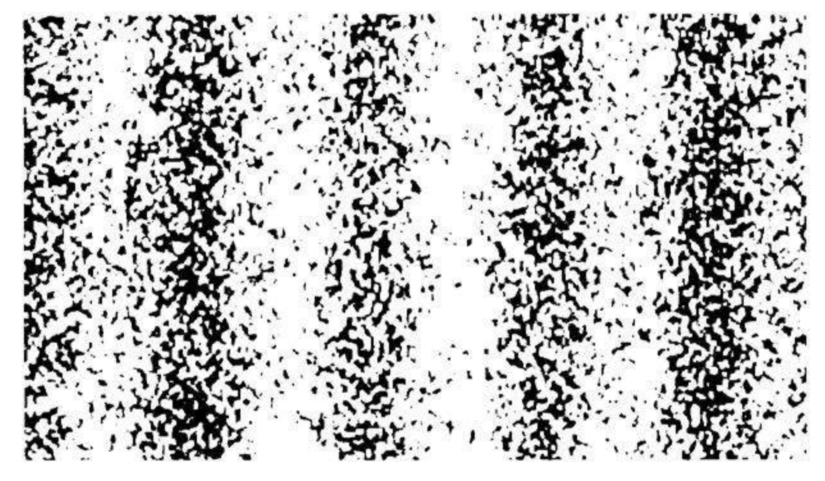
(ب)



شكل ٢ (أ) يُنتِج الضوء الذي له طولٌ موجي مفرد عند مروره عبر شقَّين متجاورين نمطًا من أهداب مضيئة ومعتمة متبادلة. يمكن تفسير هذا بالفعل من خلال النظرية الموجية للضوء، وفيها تتداخل الموجات المتراكبة تداخلًا بنَّاء (يؤدي إلى هدب لامع) وتداخلًا هدَّامًا (يؤدي إلى هدب معتم). (**ب**) لا يقتصر مثل هذا التداخل على الضوء فقط، ويمكن تمثيله بسهولة تامة باستخدام موجات الماء[1].

(١) للتوضيح، انظر https://youtu.be/luv6hY6zsd0?t=254





شكل ٣ (أ) مسار نتج عن حركات جسيم ألفا وإلكترونات انبعثت من قضيب ثوريوم مشعٍّ داخل غرفة سحابية. (**ب**) نمط تداخل شقين تَوَلَّد باستخدام إلكترونات.

إن أبسط تفسيرٍ لمثل هذه المسارات أنها تقتفي أثر مسالك أو خطوط سير الجسيمات المفردة بينما تمر عبر الغرفة.

ونصل هنا إلى تبصر برولي البارز في التاريخ. لماذا نفرض تمايزًا؟ إذا قدرت موجات الضوء على أن تكون جسيمات أيضًا (لم يكن اصطلاح الفوتونات قد صُكَّ بعد)، فهل من الممكن أن تكون الجسيمات مثل

الإلكترونات موجات أيضًا؟ تبدو الفكرة عبثية تمامًا، وفي الحقيقة رفضها بعض الفيزيائيين بعد أن وصفوها بالكوميديا الفرنسية la Comédie Française. اعتدنا الظن أن الجسيمات الأولية مثل الإلكترونات ما هي إلا شذرات صغيرة ومحددة الموضع من مادة مشحونة، وتتطلب محاولة افتراض أي تصور آخر عنها مجهودًا ذهنيًّا معتبرًا.

قد يتذكر القراء الذين عرفوا التلفاز قبل ظهور شاشات البلازما والإل سي دي LCD أنه كان يتركب من مدفع أو أكثر للإلكترونات أو «لأشعة الكاثود»، يُوَلِّد كلٌّ منها تدفُّقًا من الإلكترونات، يُسرَّع التدفق بعد ذلك ويُعدَّل من أجل توليد صور البث على شاشة مُتَفَسْفِرة.

لذلك تخيل أننا نمرِّر شعاع إلكترونات ضيقًا عبر لوح، حفرنا فيه ثقبين أو شقَّين صغيرين، تفصل بينهما مسافة ضئيلة.

قد تقودنا البداهة إلى تخيُّل أن الإلكترونات في التدفُّق في تجربة الشقَّين سوف تتخذ مسارات تمر عبر أحد الشقين أو الآخر، مثلها في ذلك كمثل رصاصات الرشاش الآلي، مُوَلِّدة خطين لامعين على الشاشة، يدلَّان على المواضع التي عبرت من خلالها الإلكترونات. نتوقع أن ألمع جزءٍ من الخطين هو المركز، إذ يكشف المركز عن الموضع الذي عبرت منه غالبية الإلكترونات في استقامة عبر الشق المقابل من دون أن يعوقها شيء، يصبح كلُّ خط من الخطين مبعثرًا بصورة أكبر كلما ابتعدنا عن المركز، إذ يدل على الإلكترونات التي تصل إلى حواف الشق وتتشتت في طريقها عبره. إلا أن هذه التجارب أُجريَت، ولم يكن هذا ما وجدناه، لقد حصلنا على نمط تداخل الشقين بدلًا من الحصول على الخطين اللامعين المميزين للجسيمات التي تتخذ مسارات مستقيمة عبر الشقين – شكل ٣ ب.

قد تكون الإلكترونات موجات أيضًا.

لم يكن تصوُّر دي برولي إلا مجرد – تصور. كان قادرًا على إنشاء علاقة رياضية مباشرة بين كمية موجية –ألا وهي الطول الموجي– وكمية جسيمية –ألا وهي الزخم الخطي[1]– بحيث:

الطول الموجي

$$\sim \; = \; \frac{h}{\bullet}$$

ثابت بلانك

الزخم الخطي

إلا أن ذلك لم يمثِّل نظرية موجية للمادة مكتملة تمامًا. ووقع التحدي على عاتق إرفين شرودنجر، ولا تزال صياغته للمسألة –التي نُشِرت لأول مرة في بدايات عام ١٩٢٦ وأُطلِق عليها الميكانيكا الموجية– تُدرَّس لطلاب العلوم إلى اليوم.

من المفترض أن كل ما نظن أننا نعرفه بخصوص نظام كمي يمكن تلخيصه في دالته الموجية

إن نظرية شرودنجر هي فعليًّا النظرية الكلاسيكية للموجات، غير أننا نستفيد فيها من علاقة دي برولي من أجل استبدال الزخم الخطي بالطول الموجي. يتطلَّب هذا أن تكون في الجعبة قليلٌ من الحيل الرياضية وبعض الافتراضات التي برهنت عن كونها غير مبررة. وعلى الرغم من أن شرودنجر نشر اشتقاقًا أكثر غموضًا، فإن الأمر قد اختُزِل فعليًّا إلى هذا. تمثَّلت النتيجة في معادلة شرودنجر الموجية.

---

(١) يشتق الزخم الخطي في الميكانيكا الكلاسيكية من الحركة المتجانسة لجسم يرتحل في خطٍّ مستقيم، ويساوي كتلة الجسم × السرعة. إلا أن حساب الزخم الخطي في ميكانيكا الكم يجري على نحوٍ مختلف، وهو ما سوف نراه لاحقًا في وقتٍ قريب.

من المفيد أن نتوقف ونفكر في هذا دقيقة. تحدد المعادلة الموجبة الكلاسيكية دالة موجية، يمكنك أن تفكر فيها على أنها تصف موجة جيبية مألوفة، تهتز في سلاسة وعلى نحوٍ متصل بين قمة وقاع. هكذا تصف المعادلة الموجية حركة هذه الموجة في المكان والزمن. لقد أدخلنا في هذه المعادلة الآن ثابت بلانك والزخم الخطي، وهو خاصية جسيمية تمامًا. إذا اعتمدنا التعبير الكلاسيكي عن الزخم باعتباره الكتلة × السرعة، يمكنك أن ترى أنه صار لدينا الآن معادلة موجية تحدد ملامح شيء له كتلة، وهو ما يُضمَّن في حلول المعادلة – الدوال الموجبة.

كيف يكون لموجة كتلة؟ إنها واحدة من نتائج ثنائية الموجة – الجسيم التي تتسبَّب في تشوش الذهن، ولقد بدأنا للتوِّ.

إن المثير تمامًا فيما يتعلق بكل هذا أن الفيزيائيين ومن بداية الأمر وقفوا يحكُّون رؤوسهم مشوشين أمام دالة شرودنجر الموجية. يبدو السبيل إلى تفسير الدالة الموجية في النظرية الموجية الكلاسيكية واضحًا تمامًا، إلا أن الدالة الموجية في ميكانيكا شرودنجر الموجية تتخذ دلالة مختلفة بالكلية، وذلك بالإضافة إلى الخواص الجسيمية التي صارت واضحة الآن، على غرار الكتلة والزخم.

لا وجود لمشكلات فعلية تكتنف الطريقة التي نفسر بها المفاهيم الماثلة في نظرية الميكانيكا الكلاسيكية. نظن أننا نعرف ما هي الكتلة. نعرف ما هي السرعة وما التسارع. إنها أشياء نرصدها مباشرة عن طريق الرصد البسيط يمكننا توضيح الفارق بين شيء يتحرك ببطء وشيء يتحرك بسرعة. عندما نقود بسرعة كبيرة ونمضي من الصفر إلى الستين في زمنٍ قصيرٍ للغاية أو عندما تنطلق بنا أفعوانة الملاهي في منحنى،

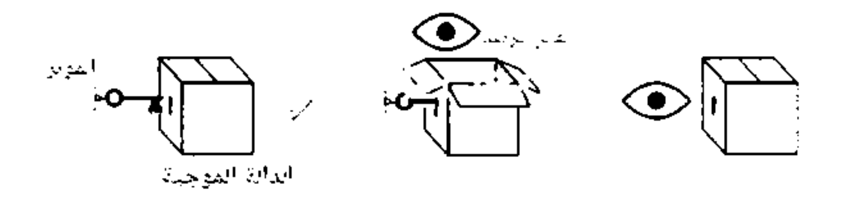
نشعر بالتسارع. يمكننا حساب الزخم الخطِّي ونعرف ما يعنيه هذا، تُدعى هذه الأشياء «بالأشياء القابلة للرصد»، وهي تستقر تمامًا على سطح المعادلات الكلاسيكية للحركة. لا حاجة بنا إلى التنقيب عميقًا على أي نحو من أجل العثور على معانٍ خفية لها. تبدو ماهية هذه الأشياء واضحة، وكذلك يبدو السبيل إلى تفسيرها واضحًا.

والآن فلتنظر إلى ما تطلب منًّا ميكانيكا شرودنجر الموجية القيام به. تريد أن تعرف الزخم الخطي لإلكترون يتحرك بحرية عبر الفراغ؟ إذن تحتاج إلى حل المعادلة الموجية وتعيين الدالة الموجية ذات الصلة، وتحديد معدل تغيُّر هذه الدالة الموجية في المكان، وضرب الناتج في سالب الجذر التربيعي لسالب ١ مضروبًا في ثابت بلانك مقسومًا على 2π[1]. تستعيد هذه العملية الزخم الخطي مضروبًا في الدالة الموجية، ويمكننا استنتاج الزخم منه.

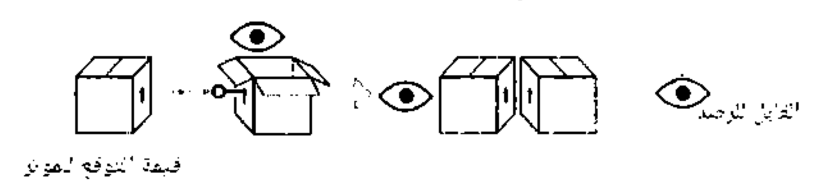
في ميكانيكا شرودنجر الموجية (وبصورة أكثر عمومية في ميكانيكا الكمِّ)، نحسب الأشياء القابلة للرصد على غرار الزخم والطاقة عن طريق القيام بعمليات رياضية معينة على الدالة الموجية ذات الصلة. من ثم تُجمَل مثل هذه الممارسات جميعها في صورة مؤثرات operators للأشياء القابلة للرصد. تُعد المؤثرات وصفاتٍ رياضية يمكننا التفكير فيها على أنها «مفاتيح» تفتح الدالة الموجية (المرسومة في الأسفل في هيئة صندوق)، تستخرج الشيء القابل للرصد منها قبل أن تغلقها من جديد. يأتي منطق الأمر على النحو التالي:

---

(١) الجذر التربيعي لسالب ١ هو «عدد تخيلي»، يُكتب عادة على صورة i. قد يبدو هذا عبثيًا، إلا أنه يواصل الظهور طوال الوقت في الرياضيات والفيزياء. وكل ما نحتاج إلى تذكُّره أن $i^2 = -1$.



يلخص الوصف في الفقرة السابقة المؤثر الرياضي (المفتاح) للزخم الخطي في ميكانيكا الكم. ثمة خطوة صغيرة أبعد. لن أذكر التفاصيل هنا، إلا أنه من البدهي تمامًا أن يُستنتج شيء يُدعى قيمة التوقع للمؤثر، وهو قيمة متوسطة من نوعٍ ما. إن لها خاصية مفيدة إذ إنه:



عندما يتواجه صندوقان متماثلان أحدهما أمام الآخر مثل «صورة في مرآة»، كما في الشكل السابق، وإذا ما تم كل شيء على نحو سليم، فإنهما يجتمعان معًا وتكون النتيجة ١. وهو ما يتركنا مع الشيء القابل للرصد فقط، وبالتالي فإن قيمة التوقُّع توفِّر لنا وصفة مفيدة لحساب قيم الأشياء القابلة للرصد مثل الزخم والطاقة.

يا للغرابة. لا يتطلَّب الأمر أن تكون عالِمًا في علوم الصواريخ كي تدرك أن ثمة شيئًا قد تغيَّر بصورة جوهرية. يبدو الأمر كأن الطبيعة اختارت إخفاء أسرارها في الدالة الموجية الكمية، ومن هنا جاءت صورة الصندوق المغلق التوضيحية. نحتاج إلى فتح الصندوق باستخدام المفتاح الصحيح (المؤثِّر) من أجل اكتشاف قيمة الشيء القابل للرصد.

يمدنا استخدام أحد أنواع المفاتيح من أجل فتح الصندوق بأحد أنواع الأشياء القابلة للرصد، مثل الزخم على سبيل المثال. ويتطلب شيءٌ مختلفٌ قابلٌ للرصد مفتاحًا مختلفًا.

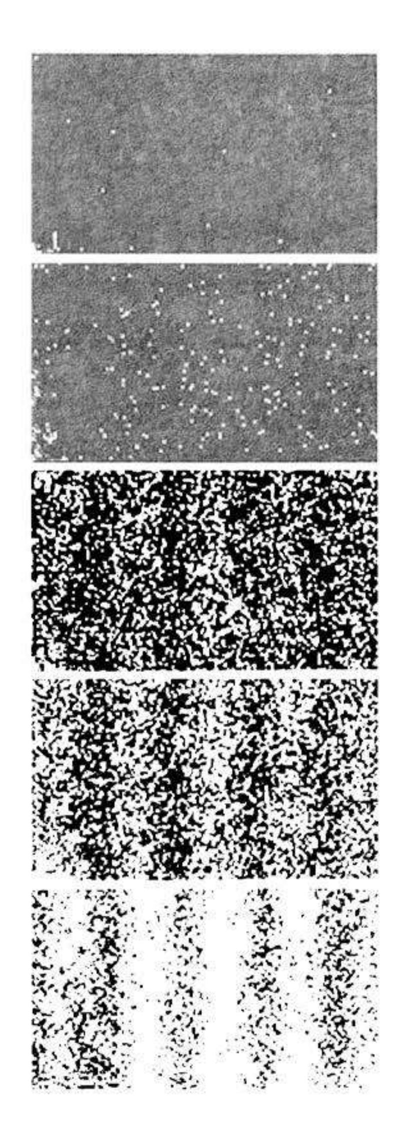
لا نحتاج أبدًا إلى القيام بأي شيء مثل هذا في الميكانيكا الكلاسيكية، نجد الأشياء القابلة للرصد هناك تمامًا أمامنا دائمًا، تحدق إلى وجوهنا.

لا، جديًّا، تتصرف الإلكترونات مثل الموجات بالفعل.

بلوغنا هذه النقطة، أودُّ أن أرجع بك إلى نمط تداخُل الإلكترونات المبيَّن في الشكل ٣ ب. قد نهزُّ أكتافنا في استهجان، ونعترف بالطبيعة الموجية للإلكترونات من دون التفكير بعمقٍ شديدٍ فيما قد يعنيه هذا. لكن دعنا نمضي بالتجربة نحو مرحلة أبعد. دعنا نقلِّل تدريجيًّا من شدة تيار الإلكترونات بحيث يمرُّ إلكترون واحد في المتوسط عبر الثقبين في الوقت الواحد، ماذا إذن؟

نجد في البداية ما يدعو تمامًا إلى الاطمئنان. يُسجَّل كل إلكترون يعبر خلال الشقين في هيئة نقطة مفردة مضيئة على الشاشة المُتَفسفرة، وهو ما يخبرنا أن «الإلكترون اصطدم بهذا الموضع هنا». يتسق هذا مع مفاهيمنا المسبقة عن الإلكترونات باعتبارها جسيمات، إذ يبدو أنها تمر -الواحد تلو الآخر- عبر شقٍّ أو الآخر من الشقين وتصطدم بالشاشة في نمطٍ، يبدو عشوائيًّا - انظر شكل ٤ أ.

انتظر، ليس النمط عشوائيًّا. مع مرور إلكترونات أكثر فأكثر عبر الشقين، نعبر الحد اللازم. نبدأ في رؤية النقاط المفردة وهي تجتمع معًا، تتراكب وتلتحم، نحصل في النهاية على نمط تداخُل الشقين لأهداب مضيئة ومعتمة متبادلة، شكل ٤ هـ.



شكل ٤ يمكننا رصد الإلكترونات عند مرورها عبر الشقين بحيث يمرُّ إلكترون واحد في المرة الواحدة، عن طريق تسجيل مكان ارتطامها في فيلم فوتوغرافي. توضح الصور الفوتوغرافية من (أ) إلى (هـ) الصور الناتجة عند رصد ١٠ و١٠٠ و٣٠٠٠ و ٢٠,٠٠٠ و٧٠,٠٠٠ إلكترون على الترتيب.

يمكننا سريعًا اكتشاف أننا نفقد نمط التداخل، إذا أغلقنا شقًّا من الشقين أو الآخر أو حاولنا اكتشاف عبر أيّ من الشقين يمر كلُّ إلكترون مفرد. نحصل إذا قمنا بذلك على السلوك المميز للجسيمات تمامًا، إذ تتبع مسارات، تأتي في خطوط مستقيمة. إذا حاولنا إلقاء نظرة من أجل اكتشاف كيفية الحصول على سلوك موجي، نحصل على سلوك الجسيمات. إذا لم نلقِ نظرة من أجل اكتشاف كيفية الحصول على سلوك موجي، نحصل على سلوك الموجات. إذا تركنا الإلكترون لحاله، يبدو كأن سلوكه يعتمد بالتأكيد بطريقة ما على وجود الشق الذي لم يمر منه، وهو الأمر الشاذ بلا ريبٍ. عوضًا عن ذلك، نستنتج أن الطبيعة الموجية للإلكترون هي سلوك جوهري. يتصرف كلُّ إلكترون منفرد كموجة، تصفها دالة موجية، إذ يمر عبر كلا الشقين في الوقت نفسه، ويتداخل مع نفسه، قبل أن يصطدم بالشاشة.

على ذلك كيف يفترض بنا أن نعرف بدقة أين سوف يظهر الإلكترون التالي.

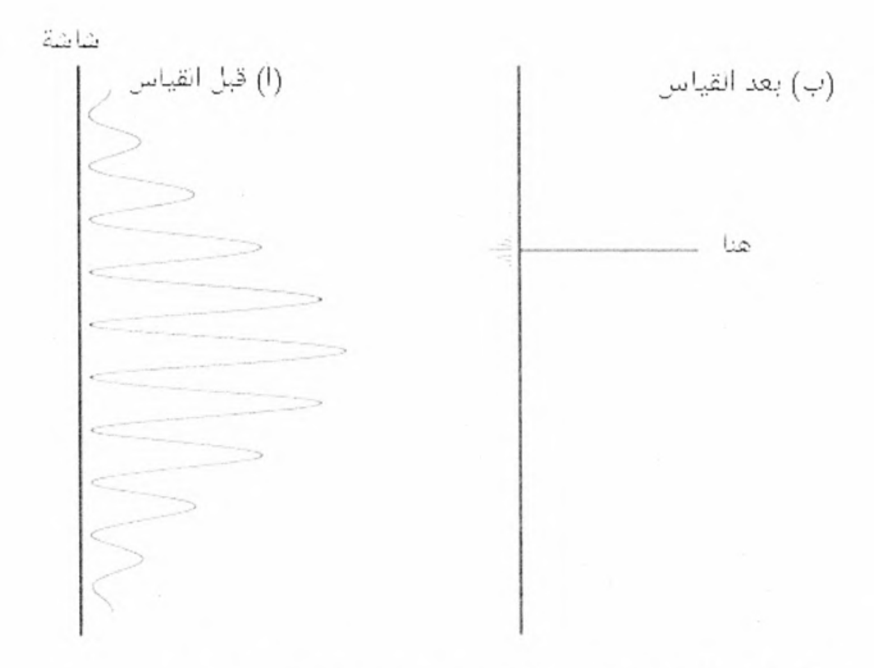
تمدُّنا الدالة الموجية باحتمالات فقط.

في ميكانيكا الكم يمكننا معرفة ما قد يحدث فقط، لا ما سوف يحدث.

تتقلب الموجة بين سعة موجبة -تبلغ أقصاها عند القمة- وسعة سالبة تبلغ أقصاها عند القاع. نحسب شدة الموجة على اعتبار أنها مربع السعة، وهو عدد موجب دائمًا. لذلك نتصور في تجربة تداخُل الشقين -الموصوفة باصطلاحات موجية خالصة- موجة ناتجة، تُوَلِّد عند تربيعها

نمطًا، فيه مناطق ذات شدة عالية (أهداب مضيئة) تتبادل مع مناطق شدتها صفر (أهداب معتمة)، كما هو مُبيَّن في الشكل ٥ أ.

إلا أن هذا النمط الخاص بالشدة منتشرٌ بعرض الشاشة بطبيعته، إنه مُوَزَّعٌ عبر المكان، أو غير محدد الموضع. نرصد إلكترونًا واحدًا في كل مرة في تجربة مثل تلك الموضحة في شكل رقم ٤، ونعرف أننا نرى الإلكترونات في صورة بقعٍ مضيئة مفردة، في موضع واحد على الشاشة. إن كل إلكترون يصطدم بالشاشة يكون محددَ الموضع.



شكل رقم ٥ (أ) قبل القياس، يتنبَّأ مربع الدالة الموجية للإلكترون بتوزيع منتشر عبر الشاشة لاحتمالات المكان الذي قد نعثر فيه على الإلكترون. (**ب**) بعد القياس، سُجِّل العثور على الإلكترون في موضعٍ واحدٍ على الشاشة، موضعٍ واحدٍ فقط.

كيف يحدث هذا؟

أراد شرودنجر تفسير الدالة الموجية باعتبارها التمثيل النظري «للموجة المادية» حرفيًّا. طرح أن الذرات هي ببساطة أنماطٌ حيود لموجات الإلكترونات التي تقبض عليها أنوية الذرات وتلتفُّ حول تلك الأنوية. إلا أنه كي نصل إلى منطقٍ لتداخل الإلكترون الواحد، كان علينا الوصول إلى تفسيرٍ بديلٍ، اقترحه ماكس بورن في وقتٍ لاحقٍ عام ١٩٢٦. فكر بورن أن مربع الدالة الموجية في ميكانيكا الكم هو مقياس لاحتمالية «العثور» على الإلكترون المرتبط بها، وليس مقياسًا لشدة موجة الإلكترون[١]. تُتَرجم القمم والقيعان المتبادلة لموجة الإلكترون إلى نمط احتمالات كميَّة - ثمة احتمالٌ كبيرٌ للعثور على الإلكترون التالي في هذا الموضع (الذي سوف يصبح هدبًا مضيئًا) وثمة احتمالٌ ضئيلٌ للغاية أو احتمالٌ صفريٌّ للعثور على الإلكترون التالي في هذا الموضع الآخر (الذي سوف يصبح هدبًا معتمًا).

فلتفكر فقط فيما يجري هنا. قبل أن يصطدم الإلكترون بالشاشة، فثمة احتمالية أن نعثر عليه «هنا» و«هناك» «وفي أي مكان تقريبًا» حيثما يكون مربع الدالة الموجية أكبر من صفر.

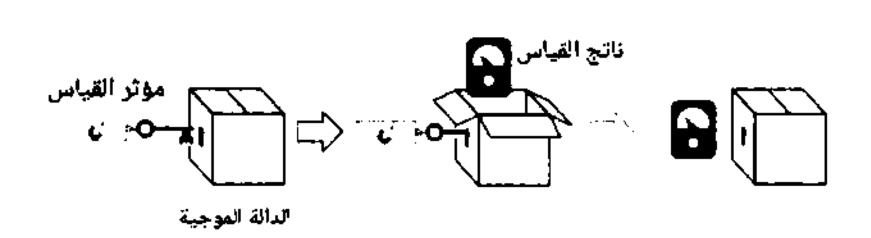
هل يعني ذلك أن إلكترونًا مفردًا قد يوجد في أكثر من مكان واحد في الوقت نفسه؟ لا، ليس فعليًّا. من الصحيح أن نقول إنه ثمة احتمالية للعثور عليه في أكثر من مكان واحد في الوقت نفسه، وثمة منطقٌ بالتأكيد

---

(١) لأن الدالة الموجية قد تحتوي على i (وهو الجذر التربيعي لسالب ١) ضربنا الدالة الموجية بمرافق عددها المركب conjugate complex، والذي تُستبدل فيه -i ب i (إذ إن $i \times -i = -i^2 = 1$)، وبالتالي نحصل دائمًا على نتيجة موجبة. إنهما فعليًّا الصندوقان المغلقان اللذان يواجه أحدهما الآخر.

في التفكير في الدالة الموجية للإلكترون باعتبارها غير محددة الموضع وموزعة. إلا أنه إذا كنَّا نشير بمصطلح «الإلكترون المفرد» إلى الإلكترون باعتباره جسيمًا، فثمة منطقٌ في الذهاب إلى أنه لا يوجد على هذا النحو حتى تتفاعل الدالة الموجية مع الشاشة، حيث يظهر عند هذه النقطة «هنا»، في مكان واحد فقط، كما هو موضح بالشكل ٥ ب.

مَثَّل ذلك معضلة، أدركها جون فون نيومان في أواخر عشرينيات وأوائل ثلاثينيات القرن العشرين. ذهب نيومان إلى أنه إذا كان «القياس» نوعًا آخر من أنواع العمليات أو الانتقالات الكمية، فإن هذا يطرح الحاجة إلى «مؤثر للقياس» على النحو التالي:



هكذا يكون ناتج القياس هو مجرد قيمة التوقُّع لمؤثر القياس.

قد تتكوَّن الدالة الموجية موضع البحث من احتمالات قياس مختلفة، على غرار مؤشر الميزان بالأعلى مشيرًا إلى اليمين أو إلى اليسار، وذلك مثل نمط التداخل الموزع الموضح في الشكل ٥ أ. أدرك فون نيومان أنه ما من شيء في البنية الرياضية لميكانيكا الكم يفسر كيفية الانتقال من نواتج محتملة عديدة إلى ناتج واحد فعلي فقط. لذلك كان مجبرًا على افتراض انتقالات غير متصلة أو قفزات من أجل ضمان أن البنية متينة ومتسقة رياضيًّا، تأخذنا هذه القفزات من المحتمل إلى الفعلي. يُعرف

هذا الافتراض عامة حاليًّا باعتباره «انهيار الدالة الموجية»، ولا شك في أنه بكل تأكيدٍ في مركز الجدل الدائر عن كيفية تفسير نظرية الكم.

لا يشبه الاحتمال الكمي الاحتمال الكلاسيكي

أمرٌ آخر إضافي. ما نعنيه ببساطة بأن ثمة احتمالًا مقداره ٥٠٪ أن العملة الملقاة سوف تستقر على «الملك» هو أن للعملة جانبين ولا نملك سبيلًا إلى معرفة أي جانب سوف يكون إلى الأعلى حين تستقر (أو التنبؤ بذلك الجانب ببساطة). إنه احتمالٌ كلاسيكي مَعْزُو إلى الجهل. نعرف في ثقة أن العملة تواصل التقلُّب بين جانبين -الملك والكتابة- بينما تدور في الهواء، إلا أننا جاهلون بتفاصيل حركتها بالضبط، لذلك لا يمكننا التنبؤ بيقين بالجانب الذي سوف يكون إلى الأعلى حين تستقر.

نعتقد أن الاحتمال الكمي مختلفٌ جدًّا. عندما نُلقي بالعملة الكمية[١] قد نكون فعليًّا على معرفة تامة بأغلب تفاصيل حركتها، إلا أننا لا نستطيع افتراض وجود «الملك» و«الكتابة» قبل أن تستقر العملة وننظر إليها.

استنكر أينشتاين عنصر الصدفة الخالصة الواضح في ميكانيكا الكم، صرَّح في قول مشهور أن «الإله لا يلعب النرد»[٢].

---

(١) سوف نرى كيفية القيام بذلك عمليًّا في الفصول اللاحقة.

(٢) كتب أينشتاين: «إن ميكانيكا الكم مثيرة للغاية، إلا أن صوتًا داخليًّا يخبرني أنها ليست الشيء الأصيل بعد. تحرز النظرية الكثير لكنها لا تكاد تقربنا من سر الواحد الأحد الأول. إنني في كل الأحوال مقتنعٌ تمامًا من أنه لا يلعب النرد». خطاب إلى ماكس بورن، ٤ ديسمبر ١٩٢٦.
Quoted in ibid., p. 443

فيما يتعلَّق بنظامٍ فيزيائي معين أو بحالة فيزيائية معينة لا وجود لما يُسمَّى بالدالة الموجية «الصحيحة»

نطلق على الفيزياء أنها علمٌ «صلبٌ» أو «منضبطٌ»، وأعني بهذه الجملة التي أوردتها أن تفاصيله النظرية الرئيسية تقوم على رياضيات صارمة، لا على كلمات أو عبارات قد تكون في الغالب ملتبسة أو مضللة. وعلى الرغم من أنه قد ينتابنا العجب من خصوبة الرياضيات الهائلة و«فعاليتها غير المعقولة»[1]، فإنها لا تزال مع ذلك «لغة»، إذا لم تُطبَّق بالحرص الكافي، لا يزال من الممكن أن يصيبها الغموض واللَّبْس.

قادتنا قرونٌ من الفيزياء المؤسَّسة على الرياضيات والناجحة للغاية إلى الاعتقاد في أن الأمر كلَّه يدور حول الحصول على الإجابة الصحيحة. تتصرَّف الطبيعة على نحوٍ معين. نقوم بهذا ويحدث ذلك في كل مرة. إذا لم تتنبأ الرياضيات بذلك بشكلٍ يقيني في كل مرة نقوم فيها بهذا، فمن ثم نميل إلى قبول أن التوصيف الرياضي غير مناسب وأننا في حاجة إلى نظرية أفضل.

في ميكانيكا الكم، تواجهنا بعض الأشياء التي قد تبدو مخالفة للبداهة، إلا أن النظرية لا تزال نظرية مؤسَّسة على الرياضيات. من المؤكد أننا قد أزحنا جانبًا الأشياء العتيقة القابلة للقياس على غرار الزخم والطاقة وأحللنا محلها مؤثرات رياضية نستخدمها كي نفتح مكافِئاتها الكمية من

(١) كان عنوان محاضرة يوجين ويجنر ضمن محاضرات ريتشارد كورنت «الفعالية غير المعقولة للرياضيات في العلوم الطبيعية»، وقد ألقاها في جامعة نيويورك في ١١ مايو ١٩٥٩. نُشِرت في Communications on Pure and Applied Mathematics, 13 (1960), 1–14.

الصندوق الذي ندعوه الدالة الموجية. إلا أننا نجد -على سبيل المثال- أن ترددات الخطوط في طيف ذرة (وبالتالي طاقاتها) دقيقة بصورة بالغة - انظر الشكل رقم ١. إذا كانت ميكانيكا الكم تتنبأ بما يجب أن تكون عليه مثل هذه الخطوط، فذلك يعني بالتأكيد الكشف عن السمات الدقيقة للدالة الموجية للإلكترون المُضمَّن في العملية.

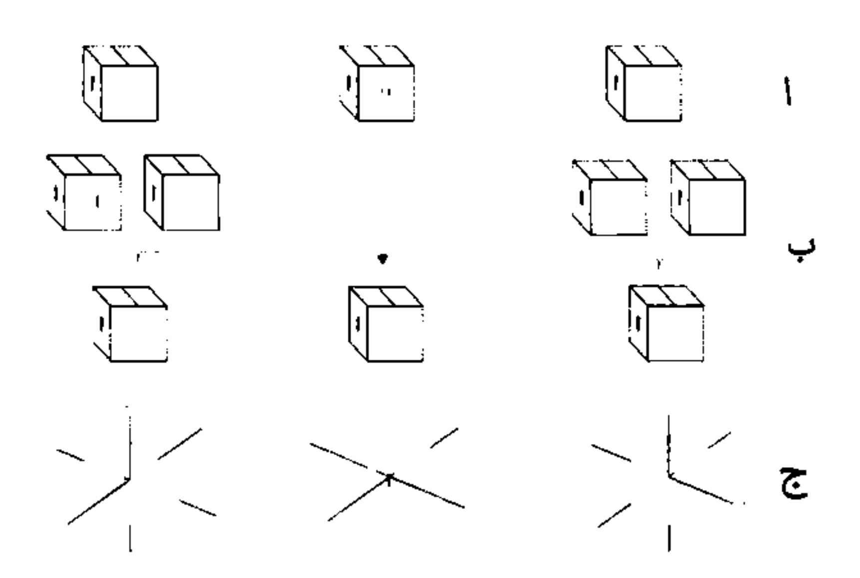
وها نحن هنا نتعثَّر بسرٍّ آخر من الأسرار الصغيرة الفاحشة لميكانيكا الكم، إذ لا وجود فعلي لِمَا يُسمَّى بالدالة الموجية «الصحيحة». إننا لا نحتاج إلا إلى دالة، تكون حلًّا صالحًا للمعادلة الموجية. ألا يعد هذا كافيًا لتعريف تلك الدالة «الصحيحة»؟ لا، ليس حقًّا. بينما توجد بعض القواعد الرياضية التي نحتاج إلى احترامها، يمكننا أخذ أي عدد من الحلول المختلفة والجمع بينها فيما يُعرف بالتراكب الكمي. ينتج عن هذا حلٌّ مقبول تمامًا كذلك للمعادلة الموجية.

أرغب في توضيح هذا الأمر بمثالٍ، نجده في النظرية الكمية لذرة الهيدروجين، تلك الذرة المكونة من نواة، تتشكَّل من بروتون مفرد، «يدور من حوله» إلكترون مفرد. في الحقيقة، كانت هذه هي المعضلة التي أشار إليها شرودنجر في ورقته العلمية في عام ١٩٢٦، تلك الورقة التي أحرزت نجاحًا باهرًا. تشكِّل الدوال الموجية التي لها أقل الطاقات الأنماط الكروية حول النواة المركزية. إلا أن ثمة دوالًا موجية لها طاقاتٌ متواضعة تتخذ شكل «الدَمبل» (على هيئة كرتين متصلتين). ثمة ثلاث دوال على هذه الصورة.

تتميز هذه الحلول الثلاثة للمعادلة الموجية جميعها بمجموعة من

الأعداد الكمية. عددان منهما نجدهما مع كل الدوال التي على هيئة دَمبل، لكن الثالث يختلف من واحدة إلى الأخرى، إذ يتخذ قيمًا هي -١ و ٠ و +١، كما هو مبين في الشكل ٦ أ. لا يهم فعليًّا ما الذي تمثِّله هذه الأعداد الكمية في الوقت الحالي. خلاصة الأمر أن هذه هي الحلول «الطبيعية» للمعادلة الموجية، إلا أنها ليست شديدة النفع عندما نصل إلى التفكير في الذرات المجتمعة في الفضاء ثلاثي الأبعاد من أجل تشكيل الجزيئات، وهو كل ما تُعنى به الكيمياء في النهاية.

من الأسهل كثيرًا التعامل مع الدوال الموجية المُعرَّفة من خلال الأبعاد المكانية الثلاثة، باستخدام الإحداثيات الديكارتية x و y و z. هذا جيدٌ فيما يتعلَّق بالدالة التي يميزها العدد الكمي ٠، إذ يمكننا تعريفها بسهولة على أنها تقع على طول الإحداثي z. لكن ماذا عن الآخرين؟ حسنًا، سوف تتكشف السهولة النسبية لهذا الأمر. من أجل الحصول على دالة موجية تتخذ اتجاهًا على طول الإحداثي y نصيغ تراكبًا كميًّا نجمع فيه الدالتين المقابلتين ل +١ و -١، كما هو مبين في الشكل ٦ ب. ومن أجل الحصول على دالة موجية تتخذ اتجاهًا على طول الإحداثي x نصيغ تراكبًا كميًّا نطرح فيه الدالة المقابلة ل +١ من الدالة المقابلة ل -١. نستطيع الوثوق بأن التراكبات الكمية تمثِّل حلولًا صالحة أيضًا، وذلك لأننا نجمع دوالًا معروف أنها حلولٌ معادلة موجية وذلك بشرط أن نتبع القواعد. الدوال الناتجة موضحة في الشكل ٦ ج وقد رُسِمت على طول الإحداثيات الثلاثة.



شكل رقم (٦) تتضمن الحلول الطبيعية لدالة شرودنجر الموجية لذرة الهيدروجين مجموعة من الدوال الموجية التي تتميز بأعداد كمية، لها القيم +١ و ٠ و -١. إلا أنه من أجل استفادة أكبر غالبًا ما تُجمع هذه الحلول وفق الطريقة الموضحة هنا، وهو ما ينتج عنه ثلاث دوال موجية تتخذ اتجاهاتٍ على طول الأبعاد المكانية الثلاثة الموصوفة من خلال الإحداثيات الديكارتية x و y و z. وعلى ذلك ما هي الدوال الموجية «الصحيحة»؟

وعلى ذلك ما هي الدوال الموجية «الصحيحة»؟ يتعلم الطلاب بسرعة كبيرة أنه ما من إجابة مباشرة بالفعل عن هذا السؤال. من الواضح أن الدالة الموجية «الصحيحة» تعتمد على نوع النظام الذي نتعامل معه، إلا أننا أحرارٌ في اختيار الصيغة المناسبة بصورة أكبر لمعضلة معينة، نحاول حلَّها.

يمكن للموجات المنتشرة وغير محددة الموضع أن تُجمع معًا بطرق تستعصي ببساطة على الجسيمات محددة الموضع، ويمكننا اغتنام هذه الفائدة إلى أبعد حدٍّ في ميكانيكا الكم.

يدور مبدأ اللا يقين لهايزنبرج حول ما نستطيع معرفته،

لا حول ما يمكننا أن نأمل فقط في معرفته.

كرِه فيرنر هايزنبرج ميكانيكا شرودنجر الموجية. ولا يعود ذلك إلى أن رياضياتها مراوِغة، بل إلى إصرار شرودنجر على اعتبار الدالة الموجية الوصف الفيزيائي الحَرفي للإلكترون على اعتبار أنه موجة مادية. تكمن الأزمة في أن الموجات تتدفق بسلاسة واتصال، وما من مساحة في هذه الصورة لقفزاتٍ كمية مفاجئة من ذلك النوع اللازم لتفسير الانتقالات التي تشكِّل طيفًا ذريًّا. أنكر شرودنجر ببساطة حدوث القفزات على الإطلاق وأصرَّ على ذلك، معلنًا أنه: «إذا كانت توجد مثل هذه القفزات الكمية اللعينة كلها بالفعل، فإنه ينبغي لي أن آسف على مشاركتي في نظرية الكم»[1].

أدرك هايزنبرج في عام ١٩٢٧ أن اللا اتصالية الجوهرية -الميل إلى القفز- التي تقع في القلب من ميكانيكا الكم تستلزم قيدًا أساسيًّا على ما نستطيع اكتشافه بخصوص قيم زوجين من الأشياء الفيزيائية القابلة للرصد، على غرار الموضع والزخم الخطي. اعتقد في البداية أن هذا القيد يظهر بسبب «عدم الانضباط» الحتمي الناجم عن استخدام أدواتنا الضخمة التي لها حجم المعمل من أجل قياس أنظمة كمية دقيقة. على

(١) Erwin Schrödinger, quoted by Werner Heisenberg in Physics and Beyond: Memories of a Life in Science (George Allen & Unwin, London, 1971), p. 75.

سبيل المثال، ذهب هايزنبرج إلى أننا إذا أردنا تحديد الموضع الدقيق لإلكترون في الفضاء، فنحن بحاجة إلى تحديد مكانه عن طريق ضربه بفوتونات لها طاقة عالية، تجعلنا نتخلَّى عن أي أمل في تحديد الزخم الدقيق للإلكترون. إن أي محاولة «لرؤية» أين هو الإلكترون (أو أين كان على الأقل) سوف تودي به بعيدًا، وهو ما يمنعنا من رؤية أين كان ومعرفة السرعة التي كان يتحرك بها.

إلا أن بور رفض ذلك، وتجادل الاثنان بشدة. أصرَّ بور على أنه لا علاقة لمبدأ اللا يقين بعدم الانضباط أو بالقياسات من جهة أخرى، وبدلًا من ذلك افترض قيدًا أساسيًا على ما قد نعرفه عن نظام كمي.

ربما تعتمد أبسط وسيلة لتفسير وجهة نظر بور على الثنائية الجوهرية للموجات والجسيمات في ميكانيكا الكم. فكر كيف قد نقيس الطول الموجي لموجة. يمكننا الاستدلال على الطول الموجي عن طريق عدِّ القمم والقيعان في منطقة محددة من الفضاء. تتكوَّن كلُّ دورة موجية من قمة واحدة وقاع واحد، والطول الموجي هو المسافة بين بداية ونهاية الدورة. لذلك نجمع عدد القمم والقيعان، ونقسمه على اثنين. يخبرنا هذا بعدد الدورات في حيزنا المكاني، ومن ثمَّ فإن الطول الموجي هو طول هذا الحيز مقسومًا على عدد الدورات.

ومن الواضح أننا سوف نعاني عند القيام بأي نوعٍ من القياسات الدقيقة إذا كان حيز العينة التي نعمل عليها أقصر من الطول الموجي. ندرك سريعًا أننا نستطيع زيادة الدقة عن طريق جعل الحيز كبيرًا بصورة تكفي لتضمين الكثير والكثير من الدورات. يزوِّدنا طول موجي دقيق عن طريق علاقة دي برولي بقياس دقيق للزخم الخطي للجسيم المصاحب. إلا أننا بالتأكيد

جعلنا حيز العينة كبيرًا عن طيب خاطر، وبذلك فقدنا أي أملٍ في قياس موضع الجسيم المصاحب بدقة. قد يكون في أي مكان هناك بالداخل.

والعكس صحيح أيضًا، من الممكن جمع عددٍ كبيرٍ من الموجات معًا في تراكب كمي، لكل موجة من هذه الموجات طولٌ موجي مختلف، بحيث يكون للموجة قمة مفردة توجد في مكان محدد للغاية، يُطلَق على مثل هذا التراكب «حزمة موجية». يعطينا هذا تركيزًا على الموضع المحدد، إلا أننا فقدنا الآن أي أمل في قياس زخم دقيق لأن حزمتنا الموجية تتكوَّن من نطاق عريض من الأطوال الموجية، مشتملة على نطاق عريض من قيم الزخم.

انعقدت السيادة لمنظور بور، وصرنا نكتب علاقة لا يقين هايزنبرج على هذا النحو[١]:

ثابت بلانك $\frac{h}{4\pi}$ ≥ (اللايقين في الزخم الخطي) × (اللايقين في الموضع)

اللايقين في الزخم الخطي

اللايقين في الموضع

لاحظ أن هذا لا يعني بأي حالٍ أن قياسات الموضع والزخم متعارضة بشكلٍ ما. يمكننا من حيث المبدأ قياس الموضع بدقة مطلقة (لا يقين صفري)، إلا أن الزخم سوف يكون غير محددٍ أبدًا: سوف يكون اللا

(١) هذه علامة ≥ «أكبر من أو مساوٍ ل». تكافئ هذه العلامة علامة «يساوي». على سبيل المثال، يمكننا قسمة كلا الجانبين على اللا يقين في الزخم، من أجل الحصول على: (4π × اللا يقين في الزخم) / h ≥ اللا يقين في الموضع. يكشف هذا مباشرة عن أنه إذا كان اللا يقين في الزخم صفر فسوف يكون اللا يقين في الموضع لا نهائيًا.

يقين بخصوصه لا نهائيًّا. لا يوجد ما يمنعنا من تحديد كل من الموضع والزخم بدقة أقل ضمن حدود مبدأ اللا يقين.

لا يقتصر المبدأ على الموضع والزخم، إذ ينطبق على أزواجٍ أخرى من الأشياء القابلة للرصد. ترتبط أشهر الأمثلة المعروفة بالطاقة والزمن، وسوف نتعرَّض لذلك مرة أخرى في الفصل الرابع، أما الآن فثمة تنبيه. ثمة آراء تذهب إلى أن علاقة لا يقين الطاقة – الزمن لا توجد فعليًّا إلا كتنويعٍ على لا يقين الموضع والزخم. برهنت المحاولات الأولى لاشتقاق علاقة الطاقة – الزمن من المبادئ الأولى عن كونها غير مرضية إلى حدٍّ ما. وبحسب ما أعرف، فإن أوسع اشتقاقات تلك العلاقة قبولًا ذلك الذي نشره ليونيد ماندلشتام وإيجور تام في عام ١٩٤٥، وهو يحدد بوضوحٍ أن «الزمن» في العلاقة يدل على فترة زمنية.

أظن أن هذا يكفي الآن. أرغب في أن يكون من الواضح لديك أن ما رسمت حدوده إلى الآن ينبني على النسخة «الرسمية» «المعتمدة» لميكانيكا الكم، تلك النسخة التي تُدَرَّس للطلاب حول العالم كله. سوف نرى في الجزء الثاني أن البحث عن معنى قد تمخض في تسعين عامًا الماضية أو قرابة ذلك عن بعض الفيزيائيين والفلاسفة الذين تحدُّوا في حبورٍ هذه السلطة، ولا ينبغي لنا أن نفترض أن النسخة التي تُدرَّس اليوم سوف يستمر تدريسها تسعين عامًا أخرى.

سوف يلاحظ القراء المفعمون بالحماسة كذلك أنني نحيتُ عن عمدٍ بعض الأمثلة الأقل شهرة عن غرابة الكم – على غرار قطة شرودنجر وتجربة أينشتاين – بودولسكي – روزن. من فضلكم تحلَّوا

بالصبر: سوف نأتي إلى هذه الأمثلة في الفصل الرابع. أريد في البداية أن أعطيكم سياقًا ما من أجل أن تفكروا فيها من خلاله.

إجمالًا، لقد رأينا أن الاكتشافات التجريبية في العقود الأولى من القرن العشرين قد أدَّت إلى إدراك أن الواقع الفيزيائي عبارة عن تكتلاتٍ في الأصل. يمكننا بأمانٍ تجاهُل ثابت بلانك في الميكانيكا الكلاسيكية للحياة اليومية وتجاهل طبيعة التكتلات التي يشير إليها كذلك، كما يمكننا افتراض أن كل شيء انسيابيٌّ ومُتصلٌ. إلا أن ثابت بلانك يسود على مستوى الجزيئات والذرات والجسيمات دون الذرية، تلك التي يتركب منها كل شيء في العالم المرئي، كما لا يعود بإمكاننا على ذلك المستوى تجاهل ثنائية الموجات والجسيمات.

فتح دي برولي صندوق باندورا[1] في عام ١٩٢٣. منحنا شرودنجر معادلته الموجية ودالته الموجية بعد ذلك بسنواتٍ قليلة. أصبحت الأشياء القابلة للقياس المألوفة تمامًا في الميكانيكا الكلاسيكية مقفولًا عليها داخل الدالة الموجية الكمية، تحتاج إلى مؤثرات رياضية كي تحرِّرها من سجنها. قال بورن إن الدوال الموجية ملغزة تمامًا، إنها تخبرنا باحتمالاتٍ كمية فقط. أوضح هايزنبرج (وبور) أنَّ قلب ميكانيكا الكم يخفق في غير يقينٍ. تعاني الطبيعة من اضطرابٍ غريبٍ في الخفقان.

ومن ثَمَّ بدأ الجدل. ما الذي تخبرنا به ميكانيكا الكم بخصوص طبيعة الواقع الفيزيائي؟ وما هو هذا الشيء المُسمَّى واقعًا بأي حال؟

---

(١) صندوق باندورا، هو صندوقٌ أَمَرَ زيوس باندورا ألا تفتحه وقد احتوى على كل الشرور، إلا أن باندورا فتحته لتخرج كل الشرور وتقتحم العالم. (المترجم).

الفصل الثاني

ما هو هذا الشيء المُسمَّى واقعًا بأي حالٍ؟

حدس الفلاسفة والعلماء وبياناتهم التجريبية

إنه كلامٌ معاد، لكن مع تقدُّمي في العمر أصبحتُ بلا شكٍّ أقل صبرًا، وأقرب إلى عجوزٍ غضوب. ازداد سخطي على عجز أنواعنا الواضح عن تعلُّم أي شيء من الماضي. وهو سخطٌ ليس مبعثه الحنين إلى «الأيام الخوالي» بكل تأكيدٍ. أقول لك ما قد يقوله أي واحد نشأ في ظل الحرب الباردة وتهديد الدمار المؤكد المصاحب لها، إن أولئك الذين نجوا من تلك الأزمان لا يتوقون إليها. على خلاف ذلك، هو سخطٌ مبعثه النظر بلا حولٍ إلى عزمٍ معقودٍ على استغلال إرث عقد من التعثُّر الاقتصادي الذي وقع في عام ٢٠٠٨ بسبب جشع قلة من المصرفيين، إذ يبدو من الواضح أنَّ هذا العزم الذي نمَّاه حديثًا الشعبويون العدوانيون الانتهازيون يفكك ما استقر في الوجدان الجمعي كما يفكك الانتصارات الثمينة لعقودٍ من الديمقراطية الليبرالية المستقرة. يبدو أننا أمام خطرٍ عظيمٍ، يهدد بنسيان كل ما تعلمناه من النجاحات العظيمة الحديثة للبشرية، وما تعلمناه من خطاياها المرعبة في الماضي.

لا يعرف نفاد صبري حدودًا، ينطبق الأمر نفسه على فهمنا «للواقع». لا يمكنني الشروع في حصر عدد الكتب والأوراق البحثية التي قرأتها، وعدد الوثائقيات التليفزيونية التي شاهدتها، تلك التي تدَّعي أنها تخبرنا كيف تصف هذه النظرية العلمية أو تلك شيئًا جديدًا وغريبًا غير معتادٍ عن الواقع، وهي تفعل ذلك من دون أدنى توضيحٍ لنوع الواقع الذي من المفترض أن تصفه.

إذا تناولت نصًّا تقديميًّا للفلسفة، فثمة فرصة جيدة لاحتوائه على أقسامٍ عن أشياء مثل الإبستمولوجيا (دراسة المعرفة والاعتقاد المبرر) والميتافيزيقا (دراسة الطبيعة الجوهرية للكينونة والوجود والأنطولوجيا الشاملة والكونيات)، والاستدلال المنطقي وفلسفة العقل والفلسفة الأخلاقية والأخلاقيات والجماليات وفلسفة العلم. إذا بحثت عن كلمة «واقع» في الفهرست، سوف تجد أنه موضوعٌ يُناقش في استفاضة تحت عنوان الميتافيزيقا.

وبالتالي فإن الواقع بالنسبة إلى الفيلسوف هو ميتافيزيقا (وهو ما يعني حرفيًّا أنها فيما وراء الفيزيقا «الطبيعة»)، ومع ذلك فإن الواقع بالنسبة إلى الفيزيائي شيء تصفه النظريات، تلك النظريات التي توصف بالعلمية من دون شكٍّ، على غرار ميكانيكا الكم. ما الذي يجري؟

انتقص بعضُ العلماء المشاهير المُوَقَّرين من الفلسفة في العلن، كتب ستيفين واينبرج المكلَّل بجائزة نوبل: «تبدو الفلسفة لي في أفضل الأحوال مثل حاشية لطيفة عن تاريخ العلم واكتشافاته»[1]. تَولَّدت

(١) Steven Weinberg, Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature (Vintage, London, 1993), p. 133.

هذه النظرة السلبية إلى الفلسفة من حكم يرى أنها لم تُوَجِّه نشأة وتطور وارتقاء النظرية العلمية، وما قد نعنيه فعليًا بذلك أنها لم تُوَجِّه نشأة وتطور وارتقاء ما نطلق عليه «المنهج العلمي»، وهي إن فعلت ذلك فبشكلٍ محدود للغاية. يقول ليونارد سسكيند المُنَظِّر بجامعة ستانفورد: «دِعنا لا نضع العربة أمام الحصان، العلم هو الحصان الذي يجر عربة الفلسفة»[1]. يقول عالم الفيزياء الفلكية لورنس كراوس: «إن الفلسفة هي الحقل الذي لم يتقدَّم بالتأكيد منذ ألفي عام، بينما تقدَّم العلم». قال ذلك في حديثٍ عن كتابه (كون من لا شيء) A Universe from Nothing، وهو مثالٌ على فلسفة رديئة ترتدي قناع العلم[2].

إنهم يشبهون على الأحرى الأعضاء المشاكسين لجبهة يهودا الشعبية في (حياة براين) لمونتي بايثون[3]، يطلب مثل هؤلاء العلماء معرفة: «ما الذي قدَّمته الفلسفة إلينا يومًا؟».

أعترف أنني لا أفهم حقيقة مثل هذه الآراء أو المواقف التي تتأسَّس عليها، لذلك دِعنا نكون واضحين تمامًا، إن الفلسفة ليست علمًا، تحرز الفلسفة تقدمًا، لكنه ليس التقدُّم نفسه الذي نميل إلى ربطه بالعلم. من

(١) Lee Smolin and Leonard Susskind, 'Smolin vs. Susskind: The Anthropic Principle', The Edge, 18 August 2004: http://www.edge. org/3rd_culture/smolin_susskind04/smolin_susskind.html

(٢) Lawrence Krauss, presentation to the American Atheists 38th National Convention, 25 March 2012, https://www.youtube.com/ watch?v=u9Fi-BqS_Fw. This comment appears around 2:33..

(٣) مونتي بايثون هي مجموعة أفلام ساخرة، وحياة براين هو أحد أشهر هذه الأفلام، وفيه تسعى جبهة يهودا الشعبية إلى التحرُّر من الرومان لكنها بدلًا من ذلك تنزلق إلى صراعاتٍ بلا معنى. (المترجم).

الصحيح في الغالب أننا لا نستطيع استخدام الفلسفة كي تدلّنا على كيفية تطوير نظرية علمية، لكنني أعتقد أنها تحمل بعض الدروس المفيدة، كما سوف نرى في الفصل التالي. في النهاية يفترض أن العلم هو صاحب هذا الدور، إلا أننا عندما ننظر من كثبٍ نجد أنه من غير الممكن فعليًّا ممارسة علم من أي نوعٍ من دون الميتافيزيقا، والمقصود بالميتافيزيقا عمومًا افتراض أشياء لا يمكننا البرهنة عليها، وهو الأمر الذي آمل أن أقدر على توضيحه لك فيما يلي. نفتح الباب للفلسفة، في اللحظة التي نقبل فيها بهذا.

لقد رأينا في الفصل الافتتاحي أن ميكانيكا الكم تجبرنا على مواجهة بعض الحقائق المزعجة بخصوص ما يمكننا أن نأمل في معرفته عن طبيعة الواقع وما لا يمكننا أن نأمل في معرفته. أؤمن بشدة أننا إذا رغبنا في فهم كيف يُفسَّر ما تخبرنا به ميكانيكا الكم، فلا مناص على الإطلاق من الإعلاء من شأن قليل من الدروس المستقاة من الفلسفة[1].

لذلك، دعنا نعود إلى الواقع. سوف نبدأ بمحاولة اكتشاف الفارق بين واقع الفيلسوف وواقع العالِم - إن كان ثمة فارقٌ.

سوف يتذكر محبُّو فيلم (المصفوفة) The Matrix الصادر عام ١٩٩٩ المشهد الذي يوجِّه مورفيوس فيه نيو: «كيف تُعرِّف الواقعي؟ إذا كنت تتحدث عما تستطيع الشعور به، عما تستطيع شمَّه، عما تستطيع

(١) وعلى أي حال ذهب المُنَظِّر كارلو روفيلي إلى أن: «أولئك الذين ينكرون نفع الفلسفة، يمارسون الفلسفة». انظر https://blogs.scientificamerican.com/observations/physics-needsphilosophy-philosophy-needs-physics/.

تذوقه ورؤيته، إذن فالواقعي ببساطة إشارات كهربية يفسرها مخك»[1]. اقضِ دقائق قليلة في التفكير في هذا، وعلى الأرجح لن تجد أي صعوبة فعلية في القبول بحقيقته الأساسية. تعتمد على الجهاز الحسي في جسمك كي تنقل مجموعة معقدة من الانطباعات الحسية إلى مخك (بعد أن حُوِّلت إلى إشارات كهربية). تتشكل هذه الانطباعات في عقلك الواعي كنتيجة بعض العمليات التي لا نفهمها حتى الآن بشكلٍ كاملٍ، وذلك من أجل توصيل مجموعة من المدركات والخبرات وهي تجتمع لصياغة تمثيلٍ للعالم من حولك. (يشير بعض الفلاسفة إلى هذه المدركات والخبرات باسم «كيفيات» qualia)، ينتج عن تلك العملية ما تدعوه واقعك، إنه يخصك بصورة محددة جدًّا وفريدة.

تعتمد هذا الظاهر لأنه ما من خيار فعلي أمامك. إذا ما قررتَ المراوغة وساءلتَ كل ما تدركه، فلن تحرز الكثير. هل هذه الزهرة حمراء بالفعل؟ ما هو «الأحمر» بأي حالٍ؟ تُعنى مثل هذه الأسئلة بخبرتك الواعية، لكن ماذا إذا لم تكن في المحيط كي تختبر الأشياء؟ إذا سقطت شجرة في غابة، ولم يكن ثمة أحدٌ كي يسمع صوت سقوطها، هل ما زالت تصدر صوتًا؟ هل لا يزال القمر هناك إذا كنتَ لا تنظر إليه، أو تفكر فيه؟ وهكذا نتجاوز الحدود مرة أخرى.

قد ترغب في عرض حجة تذهب إلى أنك في النهاية صورة لحياة شديدة الذكاء، نتجت عن أربعة مليارات عام من التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي على كوكب الأرض، تقطعها خمسة انقراضات

---

(١) Larry and Andy Wachowski, The Matrix: The Shooting Script (Newmarket Press, New York, 2001), p. 38..

جماعية على الأقل. هل من المعقول بالنسبة إلى الهوموسابيانز أنه تطور بحيث يدرك واقعًا مختلفًا في جوهره بصورة ما عمَّا عليه الواقع بالفعل، أو بصورة ما قد لا تتسق مع ما عليه الواقع بالفعل؟

إلا أنك سوف تدرك لاحقًا في لحظة أخرى تستغلها في تأمُّل هادئ أنه ما من قانون تطوري تستطيع الإشارة إليه ويضمن هذا. إن الأنواع في تدافُع محموم من أجل البقاء، نطلق على هذا التدافع حياة، وتمثِّل طفراتٌ جينية معينة أحد العوامل التي تساهم في بقاء الأنواع، إذ تجلب معها مزايا تكفل البقاء، ومن ثم يتم انتخابُها. يقف الحظ إلى جانبك، وتعيش طويلًا بما يكفي لتتناسل، ويصير من المأمول أن تمرِّر هذه المزايا إلى جيلٍ جديدٍ. إن كل ما نستطيع أن نوقن به أننا طوَّرنا تمثُّلًا ذهنيًّا منضبطًا بدقة لملامح الواقع الضرورية لضمان بقائنا. ما من ضغط انتخابي تطوري لتطوير عقل يتمثَّل الواقع كما هو بالفعل.

غير متأكد؟ تأمَّل الدليل الذي نحصل عليه من ظاهرة الحس المرافق synesthesia، وهو وضع يؤدي فيه استثارة أحد أعضاء الحس عند أولئك الذين يختبرونه[1] إلى إعلانهم عن أحاسيس «مختلطة»، إذ يؤدي إلى استجاباتٍ لا إرادية تصدر عن أحد أو بعض أعضاء الحسِّ الأخرى. يُعرف أحد الأشكال الشائعة إلى حدٍّ كبيرٍ من الترافق الحسي باسم الترافق الحسي الحرفي اللوني grapheme-colour synesthesia، وفيه تُدرك الحروف والأعداد على أنها مُلونة: «الأربعاء أزرق نيلي»[2].

---

(١) أعزف عن كتابة «أولئك الذين يعانون منه»، إذ يعتبر بعض الذين يختبرون الترافق الحسي أنفسهم مميزين.

(٢) Richard E. Cytowic and David M. Eagleman, Wednesday is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia (MIT Press, Cambridge, MA, 2009)..

من السهل نبذ هذا بوصفه توصيلًا غير صحيحٍ أو تداخلًا في الإشارات في داخل المخ، وهو ما يؤدي إلى ظهور تمثُّل غير صحيحٍ للواقع، لكن إذا كانت تقديرات نسبة حدوث هذا الأمر تصل إلى نحو أربعة في المئة من تعداد السكان، فإن أولئك الذين يعايشونه لا ينظرون إليه على هذا النحو دائمًا. من ذا الذي يقول إن أحاسيسه هي الأحاسيس «الصحيحة»؟

وقبل أن تسأل، ليس من الجيد أن تؤكد ما تدركه عن طريق مشاركة خبراتك مع أصدقائك. لو لم يكونوا ممن يختبرون الترافق الحسي (ولست كذلك ممن يختبرونه)، فإن أصدقاءك بلا شكٍّ سوف يؤكدون أنهم يدركون بالضبط الأشياء نفسها التي تدركها: «نعم، تلك الزهرة حمراء». إلا أنه، حتى لو فرضنا أن لأصدقائك عقولًا تعمل بالطريقة نفسها مثل عقلك (وهم ليسوا زومبي فلسفيًّا[1])، فإن كل ما يخبرنا به هذا أن عقولكم كلها قد تطورت وفق النمط نفسه. تعلمت عن اللون الأحمر وأنت طفلٌ صغيرٌ، ربما من صورٍ في كتاب، أشار إليها والداك بينما يقولان «أحمر» بصوتٍ عالٍ. تستطيع أن تطمئن تمامًا إلى أن معرفة أصدقائك بالألوان واستيعابهم لها جاءا من مجموعة خبرات مشابهة جدًّا. يخبرنا هذا كله أن عقولكم قد مرَّت بالتهيئة نفسها إلى حدٍّ كبيرٍ، منتجة ما أشار إليه الفيلسوف جون سيرل باعتباره «الخلفية» background.

عرف الفلاسفة هذه المعضلة المتعلقة بالواقع منذ الإغريق القدماء. كتب أفلاطون (الجمهورية) منذ ألفين وخمسمائة عام تقريبًا، ابتكر فيها

---

(١) الزومبي الفلسفي، هو تصور افتراضي لكائن له مظهر الشخص العادي ولا يمكن تمييزه عنه إلا أنه بلا وعي. (المترجم).

حكاية رمزية، يمكننا إعادة توظيفها من أجل استجلاء الأمر بصورة أكثر عمقًا، إنها حكاية الكهف الشهيرة.

يوجد في عمق الكهف عددٌ من المساجين، المقيدين إلى الجدار، عاشوا حياتهم بالكامل في الكهف، ولم يختبروا العالم بالخارج أبدًا، لا يدركون حتى أنهم مساجين.

تسود العتمة أنحاء الكهف، إلا أن المساجين مع ذلك على دراية برجال ونساء يمرون باستمرارٍ على طول الجدار أمامهم، حاملين كل أنواع الأواني والتماثيل وأشكال الحيوانات، يتحدث بعضهم بينهم وبين أنفسهم. في الحقيقة ثمة نارٌ تستعر باستمرارٍ في مؤخرة الكهف، تملؤه بضوءٍ خافتٍ. النار خارج مجال إبصارهم ولا يدري بها المساجين. أما الرجال والنساء الذين يستطيع المساجين رؤيتهم أمام الجدار البعيد هم في الحقيقة ظلال ناس فعليين يمرون أمام النار. يتشكَّل الواقع الذي يختبره المساجين من مظاهر أولية -للناس والأشياء- أخطأوا وظنُّوا أنها الأشياء نفسها.

كان الهدف من وراء حكاية أفلاطون الرمزية توضيح نظرية طبقات المعرفة الثلاث. تمثِّل الظلال الاعتقاد الشائع أو الرأي العام (دكسا) doxa والقائم بالكاد على المظاهر. تمثِّل الأشياء نفسها شكلًا أعمق من أشكال الفهم المستقاة -على سبيل المثال- من العلم (إبستمي episteme وهي الكلمة التي حصلنا منها على كلمة إبستمولوجيا). أما أعلى الطبقات فهي noesis أو «nous»، وهي المعرفة التي تمضي إلى ما هو أبعد من

الحقائق السطحية للأشياء وتُعنى بمضمونها وطبيعتها[١]. إلا أن الحكاية الرمزية تخدم هدفنا هنا باعتبارها توضيحًا لحقيقة أننا نحن البشر نعتمد على حواسنا من أجل توليد تمثُّلنا للواقع، تعلَّمنا التعامل مع هذا التمثُّل على أنه حقيقيٌّ وأصيلٌ، وتعلَّمنا أن نأخذه على علّاته؛ إذ تُعَد مساءلة كل شيء نختبره في حياتنا اليومية مضيعة للوقت.

مع ذلك علينا الاعتراف بأن معرفتنا ما هي إلا حقيقة ساذجة. يتشكَّل واقعنا من الظلال، من الأشكال كما تبدو، وما من طريقة فعلية لدينا لمعرفة إلى أي مدى يعكس تمثلنا -الذي تشكِّله مداركنا- الواقع كما هو بالفعل، إلى أي مدى يعكس تمثلنا واقع الأشياء كما هي في نفسها.

إذن كيف يمكننا التيقن بأن واقع الأشياء كما هي في نفسها موجود حقًّا؟ حسنًا، لا يمكننا ذلك، لكن دِعنا نمرِّر سريعًا إلى الأمام ألفي عام حتى نصل إلى عام ١٧٨١، حيث الفيلسوف العظيم إيمانويل كانط. يُفرِّق كانط في (نقد العقل الخالص) بين ما يُدعى «النومينا» noumena، أشياء الواقع الميتافيزيقية أو الأشياء في نفسها، تلك التي يمكننا تصورها في عقولنا فقط، والفينومينا phenomena (الظواهر) التجريبية، الظلال أو الأشياء كما تبدو في مداركنا وخبراتنا[٢].

---

(١) شكرًا لمكيلا ماسيمي التي نطقت لي هذه الكلمة في تواصل شخصي يرجع إلى ٢٠ مارس ٢٠١٩.

(٢) ينبغي لي توضيح أن تعريف النومينون noumenon باستخدام اصطلاح كانط «الشيء في ذاته» (Ding an sich)، لا يزال موضع جدل بين الفلاسفة إلى اليوم، ولا يزال مختلَفًا عليه بدرجة ما. ويمكنك من أجل عرض جيد للأمر مطالعة Sebastian and Gardner, Kant and the Critique of Pure Reason (Routledge, London, 1999), pp. 200-1.

لا تعتبر أن هذا يعني أن النومينا هي مجرد تلفيقاتٍ لمخيلة خصبة. يمكنني تخيُّل جميع أنواع الأشياء المسلية - على غرار جاندالف[1] أو اليونيكورن (وحيد القرن) أو ويستروس[2]، إلا أنه من الواضح عدم ارتباطها جميعًا بالظواهر، لا تكشف عن نفسها في هيئة أشياء يمكننا إدراكها مباشرة، إلا في أعمالٍ خيالية.

يمكننا بشكلٍ أكثر عملية الإشارة إلى كثيرٍ من الطرق التي تكشف بها ما ندعوه «بالإلكترونات» عن نفسها في واقعنا التجريبي، إنها الإلكترونات كما تبدو. لكنَّ إلكترونًا في نفسه من دون أي نوع من التفاعلات -يكشف عن نفسه من خلالها- لا يوجد إلا في خيالاتنا، وذلك بصورة ما من خلال التعريف.

ادَّعى كانط أنه لا معنى لإنكار وجود الأشياء في نفسها، إذ إنه لا بُدَّ أن توجد بعض الأشياء التي تسبِّب المظاهر التي تأتي في صورة مدركات حسية: يستحيل أن توجد مظاهر من دون شيء يظهر[3]. ولا يعني عجزنا عن إدراك الواقع كما هو بالفعل أنه قد توقف عن الوجود. أعاد كاتب

---

(١) شخصية خيالية من سلسلة (ملك الخواتم) و(الهوبيت). (المترجم).

(٢) العالم الذي تقع فيه أحداث أغنية الجليد والنار لجورج مارتن. (المترجم).

(٣) يمضي (نقد) كانط بصورة معقدة صعبة، ومن الواضح أنه لم يوظِّف الفينومينا (الظواهر) بالبساطة والمباشرة نفسها التي أطرحها هنا. لا تأتي الفينومينا من النومينا بالطريقة نفسها التي تلقي بها الأشياء الظلال في كهف أفلاطون. لا تفكر حواسنا، ولا يمكن للعقل البشري أن يحدس شيئًا من دون إدراكٍ حسيٍّ. من أجل اكتساب المعرفة نحتاج إلى استجلاب الاثنين معًا. وعلى ذلك فإن الفينومينا هي «مظاهر مُتصوَّرة»، تحددها الطريقة التي يعمل بها العقل، متضمنة بديهيات المكان والزمان الخاصة بنا. ذهب كانط إلى أن مثل هذه المظاهر مع ذلك موضوعية، وهو ما تستلزمه «الوحدة التركيبية للفكر».

الخيال العلمي العظيم فيليب كيندر ديك صياغة كانط بالتأكيد عندما لاحظ أن: «الواقع هو ما لا يتلاشى عندما تتوقف عن الاعتقاد فيه»[1].

إلا أن علينا القبول بالمقايضة. بينما قد نستنتج في سرورٍ أن الأشياء في نفسها موجودة بالتأكيد، علينا القبول في كدرٍ بأننا لا نستطيع اكتساب أي معرفة بها. عندما نحكم على الأمر من منظور الطبقات الثلاث لأفلاطون، ينكر كانط إمكانية noesis – لا يمكننا الحصول على معرفة بمضمون وطبيعة الأشياء في نفسها أبدًا.

واجهنا في الفصل السابق انفصالًا كبيرًا آخر من نوعٍ مختلفٍ للغاية، لكنه لا يقل عمقًا، إنه الانفصال القائم بين العالم الكمي للامتدادات الجزيئية والذرية ودون النووية وبين عالم الخبرة اليومية الكلاسيكي. إنه الانفصال الذي خلقه صندوق الدالة الموجية المغلق ومؤثرات القياس وانهيار الدالة الموجية. سوف نكتشف أن قلقنا بخصوص العلاقة القائمة بين الواقع والإدراك قد رُحِّل ليصبح بين الواقع والقياس. سوف نجد أنه لا يمكننا الاستمرار في افتراض أن ما نقيسه يعكس بالضرورة الواقع كما هو بالفعل، وسوف نجد فارقًا بين الأشياء في نفسها والأشياء كما تُقاس.

أطلق الفيزيائي والفيلسوف المعاصر برنارد ديسبانات على ذلك اسم «الواقع المحتجب»، وعلّق قائلًا: «علينا استنتاج أن الواقع الفيزيائي «مثالي»، نبقى بعيدين عنه. في الحقيقة، تكشف مقارنة بين الأحوال

---

(1) Philip K. Dick, from the 1978 essay 'How to Build a Universe that Doesn't Fall Apart Two Days Later', included in the anthology I Hope I Shall Arrive Soon, edited by Mark Hurst and Paul Williams (Grafton Books, London, 1988). This quote appears on p. 10.

المحيطة بنا وتلك التي حكمت الماضي عن أننا أبعد عن الواقع بكثيرٍ إذا ما نظرنا إلى ما ظنه أسلافنا عن أنفسهم بخصوص هذا الأمر منذ قرن مضى»[١].

ولذلك يعتبر الفلاسفة أي شكل من أشكال التخمين أو أي مفهومٍ أو نقاش أو تحليل أو نظرية تدور حول طبيعة واقع الأشياء في نفسها من قبيل الميتافيزيقيا[٢].

من المحتمل أن يبدأ القراء البرجمانيون في فقدان صبرهم ببلوغنا هذا الموضع. من المعروف عن الفلاسفة ميلهم إلى الجدل وإثارة البلبلة والتشوش، من المعروف عنهم ميلهم إلى رؤية المعضلات حيث لا توجد، وخلق جبالٍ من كومات تراب (يصنعون من الحبة قبة). إن كل هذه الأمور عن النومينا والفينومينا حسنة جدًّا، إلا أن العلماء لا يرغبون في تضييع وقتهم الثمين، والتفتيش في معاني الكلمات. قال الفيلسوف كارل بوبر في مرة بينما يلقي بكتابٍ بقوة على منضدة أمامه: «تلك هي الفيزياء»[٣].

---

(١) Bernard d'Espagnat, Reality and the Physicist: Knowledge, Duration and the Quantum World (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1989), p. 115.

(٢) وذلك على الأقل منذ كانط، ويمكن القول، منذ أفلاطون. لم يمنع هذا بالتأكيد بعض الفلاسفة (وبعض الفيزيائيين النظريين، كما سوف نرى لاحقًا في هذا الكتاب) من الذهاب إلى أن الميتافيزيقا البحتة لا يزال في إمكانها بطريقة ما توليد معرفة موضوعية.

(٣) Karl Popper, quoted in John Horgan, The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age (Abacus, London, 1998), p. 35.

إنَّ العلم مختلفٌ بالتأكيد، يواصل في مثابرة جمع الحقائق الصلبة والمثبتة والقابلة للتكرار. يطوِّر الفيزيائيون نظرياتٍ يمكنها احتواء هذه الحقائق وتفسير الأنماط التي تشكلها من منطلق بعض قوانين الطبيعة التي تقف من ورائها. تقوم هذه النظريات بتنبؤاتٍ يمكن اختبارها عن طريق الاستدلال بأرصاد أو تجارب جديدة، تُوَلِّد حقائق جديدة. لا تنسجم الحقائق الجديدة في بعض الأحيان، وبذلك إما أن تُلوى النظرية بطريقة ما وإما يُلقى بها وتُستبدَل بها نظرية جديدة، هذه هي الطريقة التي يحرز بها العلم تقدُّمًا بطرقٍ لا تعرفها الفلسفة (وذلك وفق ما يراه كراوس على الأقل).

باستثناء أن هذا ليس بمثل تلك البساطة التامة، كما سوف نرى في الفصل اللاحق.

حسنًا، هكذا لا يمكننا أن نستيقن أبدًا أن الواقع الذي ندركه أو نقيسه يعكس أو يمثِّل الأشياء في نفسها، إلا أنه من الواضح تمامًا أن هذا لا يمنعنا من القيام بأرصادٍ، وإجراء تجارب، وتطوير نظريات علمية، واختبارها. لا يزال في إمكاننا إقرار أنه إذا فعلنا هذا، فسوف يحدث ذلك. لا يزال في إمكاننا التأسيس لحقائق صلبة عن الظلال -الإسقاطات التي نظن أن الواقع (بأي صورة نظنُّها عنه) قد رماها على عالم الإدراك والقياس الخاص بنا- ويمكننا مقارنة هذه الحقائق بحقائق مشابهة حصل عليها آخرون. إذا اتفقت هذه الحقائق، إذن فمن المؤكد أننا تعلمنا شيئًا عن طبيعة الواقع؟

في الحقيقة، هذه هي الصفقة التي نبرمها. يخبرنا الفلاسفة أن الواقع في نفسه ميتافيزيقي. وعلى الرغم من أن العلماء لا يعترفون صراحة وبشكلٍ علني بذلك في الغالب، فإن الواقع الذي يدرسونه هو بالأصل واقعٌ تجريبي، يُستدل عليه من دراستهم للظلال. إنه الواقع التجريبي للرصد والتجربة والقياس والإدراك، إنه الواقع التجريبي للأشياء كما تظهر وللأشياء كما تُقاس. شرح هايزنبرج هذا في مرة: «علينا أن نتذكر دائمًا أن ما نرصده، ليس الطبيعة في نفسها لكنها الطبيعة المتكشفة لمناهجنا في البحث»(١).

لم نفرغ تمامًا بعد. يعمل العلماء على الوجه الأفضل في داخل إطارٍ مؤسَّس على قوانين وقواعد. يحتاجون إلى معايير. وعلى الرغم من أننا قد لا نستطيع اكتساب معرفة عن الواقع الميتافيزيقي في نفسه، فإنه يمكننا اتباع كانط (وفيليب كيندر ديك) وافتراض أن مثل هذا الواقع موجودٌ بالتأكيد. يستحيل أن توجد مظاهر من دون شيء يظهر. علاوة على ذلك، يجب أن يوجد بشكلٍ موضوعي ومستقلٍّ عن قدرتنا على رصده أو قياسه بالتأكيد. نتوقع استمرار سقوط الظلال على الجدار سواء كان ثمة سجناء في الكهف كي يرصدوها أو لم يكن هناك أي سجناء.

قد نتفق مع التالي أيضًا، بغض النظر عن كينونة الواقع، فإنه يبدو عقلانيًا وقابلًا للتنبؤ به، على الأقل ضمن حدود. يبدو متسقًا منطقيًا. من المؤكد أن الظلال التي ندركها ونقيسها غير مستقلة بالكامل عن الأشياء

---

(١) Werner Heisenberg, Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science (Penguin, London, 1989; first published 1958), p. 46.

في نفسها التي تتسبَّب فيها، وإلا فإن كل شيء يمضي وأي علم من أي نوع سوف يكون مستحيلًا. وعلى الرغم من عدم مقدرتنا على إحراز أي معرفة بالأشياء في نفسها أبدًا -كما ادَّعى كانط- فإنه يمكننا افتراض أن خواص الظلال الساقطة وسلوكها تتحدَّد بطريقة ما بالأشياء التي تُسقِطها.

الحقيقة أنَّ الواقع التجريبي مكانٌ بليدٌ جدًّا. إنه واقعٌ يتكوَّن فقط من أعدادٍ، من تأثيراتٍ، واقع عند القيام فيه بهذا نحصل على ذلك. تخيل ورقة بحثية تقول: «فعلنا هذه الأمور، وحصلنا على هذه النتائج» نقطة، انتهت القصة. ليس للأعداد أو للتأثيرات معنى حتى نحاول تفسيرها، ولكي نفعل هذا، ننشئ نظرية تحاول تفسير ما يجري، ويصاحب ذلك رغبة عريضة في تحسين فهمنا. وأرى أن أي شكلٍ من أشكال التنظير العلمي يستحيل ببساطة من دون افتراض الوجود المستقل للواقع واتساقه العقلي والمنطقي، ذلك الواقع الذي يقع من وراء كل الخبرات التجريبية الجرداء.

ما هي مبررات هذه الافتراضات؟ ها هو أحد الاقتباسات من أينشتاين مرة أخرى، مخاطرًا بشدة بتكرار ما سبق وأشرنا إليه: «لا أملك اصطلاحًا أفضل من كلمة «مُعتَقد» للتعبير عن هذه الثقة بطبيعة الواقع المنطقية العقلانية، والثقة بيسر وصول الاستدلال العقلي إليه بدرجة ما»[١].

---

(1) Albert Einstein, quoted in Maurice Solovine, Albert Einstein: Lettres à Maurice Solovine (Gauthier-Villars, Paris, 1956). This quote is reproduced in Arthur Fine, The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory, 2nd edition (University of Chicago Press, Chicago, 1986), p. 110.

لا يفكر العلماء في العموم بشدة ولمدة طويلة في هذه الافتراضات، ولا ينظرون إليها في تعمُّقٍ شديدٍ. يعتبرها الكثيرون واضحة بشكل بدهيٍّ. إلا أن قبول مثل هذه الافتراضات يعني الاندفاع إلى موقف فلسفي معين. ولهذا الموقف اسمٌ - إذ يُدعى «واقعية علمية». ومن الطريف أن أولئك الذين لم يفكروا في الأمر على الإطلاق لا يستطيعون تجنُّب القيام بالالتزام نفسه نحو موقفٍ بديلٍ، سواء عرفوا ذلك أم لم يعرفوا، وهو موقف على صلة «بالواقعية العلمية» يُعرف باسم «الواقعية الساذجة»، وهو اسم طالما ظننتُ أنه يحمل شيئًا من الازدراء، مثلهم كمثل السيد جوردان في مسرحية موليير (البرجوازي النبيل)، الذي اكتشف أنه كان يتحدث نثرًا طوال حياته بالفعل، وعلى ذلك قد يكتشف بعض العلماء -على الأقل جزئيًا- أنهم قد تبنَّوا موقفًا فلسفيًّا محددًا طوال حياتهم المهنية التي مارسوا فيها العلم.

إن أغلب العلماء واقعيون سواء عرفوا ذلك أم لم يعرفوا، إلا أن العديد منهم لا يزعجون أنفسهم بالأسئلة الكبرى حول طبيعة الواقع، التي يتركونها بسعادة للفلاسفة. على الرغم من أن فلسفة أينشتاين نشأت خلال سنواته الأولى، فإنه كان واقعيًّا فيما يخصُّ ميكانيكا الكم[1]، كما كان شرودنجر (وبوبر) واقعيين. لقد تدربتُ كعالمٍ تجريبي منذ سنواتٍ عديدة مضت، ويمكنني إخباركَ أنه من الصعب حقًّا العمل في معمل والحفاظ على صحتك الذهنية من دون بعض الاعتقاد بواقعية الأشياء

---

(١) قرأ أينشتاين (نقد العقل الخالص) لكانط في الثالثة عشرة من عمره، وكان كانط فيلسوفه المفضل لبعض الوقت.

التي تجري عليها التجارِب.

لذلك دعنا نضع ركيزة الواقعي انطلاقًا من فرضية (يحب الفلاسفة الفرضيات)[1].

فرضية الواقعي #١: لا يزال القمر هناك عندما لا ينظر أحدٌ إليه (أو يفكر فيه).

توفِّر علينا هذه الفرضية الكثير من الوقت بالفعل. تقول في الأساس إن الواقع (مهما كان) موجودٌ بالفعل، وعلاوة على ذلك، يوجد مستقلًّا عن قدرتنا على القيام بأرصاد أو قياسات تجريبية عليه. يواصل الوجود بغض النظر عما إذا كان أحدهم يفكر فيه أم لا. إنه موضوعي، غير ذاتي. لا يعتمد في وجوده عليَّ أو (عليكَ).

من اللازم الاعتراف بأنه لا يهم كيف قد تبدو لك الفرضية #١ معقولة، إذ إنها على الرغم من ذلك فإنها مجرد افتراض. علاوة على ذلك، هو افتراض لن تقدر على إثباته أبدًا. ويعني قبول ذلك إدخال الميتافيزيقا في أساسات العلم.

الآن، علينا القيام بشيء فيما يتعلق بحقيقة أن الكثير للغاية من العلم (وكل ميكانيكا الكم إلى حدٍّ كبيرٍ) تتعامل مع أشياء، لا يمكننا رصدها مباشرة، إذ لا نحصل بخصوصها إلا على أدلة تجريبية غير مباشرة. إنها

(١) سوف أشير بصورة متكررة إلى هذه الفرضيات خلال بقية الكتاب. ولكي أوفر عليك عناء العودة إلى هنا من أجل تذكير نفسك بها، جمعتها كلها لك في ملحقٍ يسهل الوصول إليه في آخر هذا الكتاب.

أشياء على غرار الفوتونات والإلكترونات والكواركات. تُوَلِّد تأثيرات في واقعنا التجريبي للخبرة – على غرار أنماط التداخل والخطوط في الغرفة السحابية ونفثات «الهدرونات» في مصادم الهدرونات الكبير في سيرن CERN، والتي يمكن عزوها إلى سلوك الكواركات والجلونات، الجسيمات التي تحمل القوى التي تمسك الكواركات معًا داخل البروتونات والنيوترونات. اخترنا تفسير هذه التأثيرات من خلال كيانات كمية «غير مرئية»، نعزو إليها خواصًا فيزيائية مثل الكتلة والشحنة الكهربية واللف المغزلي والنكهة واللون. من ثم نفسر السلوك التجريبي القابل للرصد من خلال الخواص التي عزوناها إلى هذه الكيانات غير المرئية.

دعنا نتفق –مستندين في ذلك إلى النقاش السابق– على أن هذه الخواص تخبرنا عن الأشياء كما تبدو أو كما تُقاس فقط، ولا نملك سبيلًا إلى الحصول على معرفة بالفوتونات في نفسها أو بالإلكترونات في نفسها وهكذا. إلا أن هذا لا يمنعنا من افتراض أن الأشياء في نفسها موجودة بالفعل، مستقلة عن أي أدوات تلزم لإجراء قياسات عليها. على سبيل المثال، نرى أنماطًا سلوكية، نفسِّرها من خلال الشحنة الكهربية، إلا أن الشحنة الكهربية هي مجرد تجلٍّ تجريبي لخاصية «في الواقع» –أيًّا ما كانت– تُوَلِّد هذه التأثيرات. قد تكون هذه الخاصية شحنة كهربية كما نفهمها، إلا أنه ما من سبيل إلى معرفة الحقيقة.

أنوي التركيز هنا على الواقع أو على الكيانات نفسها، إذ أنحي جانبًا التدبُّر في خواصها للفصل التالي. تأتي إحدى حججي المفضَّلة

بخصوص «واقعية الكيانات» من الفيلسوف إيان هاكينج. يصف هاكينج في فقرة من كتابه (التمثيل والتدخل Representing and Intervening) الصادر عام ١٩٨٣ تفاصيل سلسلة من التجارب المصمَّمة لاستطلاع الإمكانية التقنية للكشف عن الشحنات الكسرية المميزة للكواركات «الحرة» (كانت الإجابة بالنفي للأسف). تضمَّنت التجربة دراسة تدفُّق الشحنة الكهربية عبر أسطح كرات النيوبيوم فائق التوصيل[١]:

والآن كيف يغير الواحد من الشحنة على كرة النيوبيوم؟ قال صديقي: «حسنًا، في تلك المرحلة نرشُّها بالبوزيترونات كي نزيد الشحنة أو بالإلكترونات كي نقلِّل الشحنة». صرت منذ ذلك اليوم مؤمنًا بالواقعية العلمية، رأيي أنه إذا كان في إمكانك رشُّها، إذن فهي واقعية.

يؤمن هاكينج بواقعية الكيانات غير المرئية، إلا أن هذا لا يعني أنه يقبل بأن النظريات العلمية عن مثل هذه الكيانات «حقيقية» بالضرورة. سوف نهتم بالتمثيل العلمي للخواص والسلوكيات في الفصل التالي، لكنني اكتشفت أنه ليس في إمكاني العثور على كلمات أفضل من هذه الكلمات ما دمنا كنَّا معنيين بواقعية الكيانات:

فرضية الواقعي #٢: إذا كان في إمكانك رشُّها، إذن فهي واقعية.

ينبغي لهذا أن يوفر بعضَ الوقت أيضًا.

---

(١) Ian Hacking, Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1983), p. 23.

قد تميل إلى التفكير في أننا الآن أمام اختيارٍ بسيطٍ بين واقعية الفيلسوف الميتافيزيقية وواقعية العالِم التجريبية. ذهب بعض العلماء والفلاسفة بالفعل إلى أنه اختيارٌ مباشرٌ بين الميتافيزيقا والتجريبية (الإمبيريقية) مثله كمثل الاختيار بين الأبيض والأسود. قاد رفضٌ مطلقٌ للميتافيزيقا إرنست ماخ الإمبريقي المتطرف إلى استنتاج أنه يستحيل أن تكون هناك أشياء مثل الذرات. في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين استنتجت مجموعة تُدعى حلقة ڤيينا -يقودها الفلاسفة موريتز شليك ورودولف كارناب وأتو نويرات- أنه يجب رفض الميتافيزيقا باعتبارها بلا معنى. حاولوا تأسيس فلسفة قائمة على العلم، الخبرة هي المصدر الوحيد الصالح للمعرفة فيها. هذه هي (الوضعية المنطقية)، صنف من صنوف فلسفة «الرؤية هي التصديق»، وهي فلسفة تأثرت مباشرة بماخ[١].

غير أن حقيقة الأمر أن ماخ فهم الذرات بصورة خاطئة على نحوٍ ميؤوسٍ منه، وفشل برنامج الوضعية المنطقية[٢].من المستحيل فعليًا

---

(١) عليَّ الاعتراف أنني سمعت لأول مرة عن الوضعية المنطقية من العرض الأسترالي غير المشهور «آل بروس» Bruces sketch الذي ظهر في حلقة من حلقات (السيرك الطائر) لمونتي بايثون، أُذيعت لأول مرة في نوفمبر ١٩٧٠ (كنت في الثالثة عشرة). و«آل بروس» هي مجموعة في قسم الفلسفة في جامعة ولامالو، يُدعى كل أعضاء الكلية فيها باسم بروس. «والآن، فإن بروس يُدَرِّس الفلسفة الكلاسيكية، ويُدَرِّس بروس الفلسفة الهيجلية، أما بروس هنا فيُدَرِّس الوضعية المنطقية وهو مسؤول كذلك عن مكان غسل الخِراف». From Monty Python's Flying Circus: Just the Words, volume 1 (Mandarin Paperbacks, London, 1990), p. 295.

(٢) كان أينشتاين طوال الوقت مدينًا بنهجه في الفيزياء لماخ، إلا أنه لم ينتهج نهجه التجريبي المتشدد في الفلسفة. علَّق أينشتاين في مرة: «كان ماخ جيدًا في الميكانيكا بقدر بؤسه في الفلسفة». Quoted in Abraham Pais, Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford University Press, Oxford, 1982). This quote appears on p. 283.

تخليص العلم من الميتافيزيقا كلها، وبالصدفة فإن هذا الفهم هو أحد السبل التي يمكن عن طريقها إدراك أن الفلسفة تحرز تقدُّمًا. وهو تفسير آخر لانتهاء الحال بالعلماء حتمًا إلى ممارسة بعض الفلسفة، سواء انتبهوا لذلك أم لم ينتبهوا.

تظهر المعضلات بمجرد محاولة تجاوز الدليل التجريبي - الأعداد والتأثيرات وعند القيام بهذا نحصل على ذلك. يعني تجاوز الدليل فتح الباب للميتافيزيقا، وذلك لسببٍ بسيطٍ، إذ إنه من المستحيل الاشتباك مع أي حوارٍ ذي معنى عن «لماذا» و«كيف» من دون تطوير بعض المفاهيم عن الواقع أولًا، وهو الواقع الذي نفترض وجوده فيما وراء البيانات التجريبية. لا يملك العلماء الذين يختارون هذا الطريق إلا ترك العنان للميتافيزيقي الساكن داخلهم.

يصل بنا ذلك بشكلٍ رائعٍ إلى التشبيه الذي ذكرتُه في التمهيد. من أجل أن نفهم كيف يُمارس العلم، نحتاج إلى التعرُّف على الطرق المختلفة التي يوظِّفها العلماء والفلاسفة للتفكير في الواقع، ونحتاج إلى احترام هذه الطرق المختلفة، كما نحتاج إلى فهم واحترام العلاقة المهمة في جوهرها القائمة فيما بينها. لقد حاولتُ تحقيق هذا عن طريق تصوُّرها في هيئة شواطئ، يفصل بينها بحرٌ، كما هو مبين في شكل رقم ٧.



شكل رقم ٧ : مجاز يعبر عن التنظير العلمي: الإبحار بسفينة العلم عبر بحر التمثل، بين شواطئ الواقع الميتافيزيقي والتجريبي.

في شطحة من شطحات الخيال، فكرت في شواطئ الواقع الميتافيزيقي كما لو كانت شواطئ شاعرية. إنه مكانٌ دافئ ومشمس ومرحب عبارة عن شواطئ رملية ناعمة ونباتات استوائية موفورة. إنه مكانٌ للخيال المجرد والمثالية المطلقة. تجد هنا تصوراتٍ عمَّا يحتمل أن تكون عليه الحقيقة أو من المرجح أن تكون عليه أو ينبغي لها أن تكون عليه. إنها تصوراتٌ تأتي من القيم الشخصية أو التحيزات المسبقة للعلماء الفرادى الذين يزورونها، وتتأسس على كل ما تعلموه ووصلوا إلى فهمه عن طبيعة الواقع، وأشياء عديدة لا يمكنهم إلا تخمينها.

إنه مكانٌ حيث يستطيع العلماء أن يكونوا بشرًا - أقرب إلى كيرك منهم إلى سبوك[1]. يستطيعون هنا التعبير عن مشاعرهم، وإطلاق سراح رغباتهم، والتنفيس عن إحباطاتهم، وأن يكونوا أنفسهم فقط. من الممكن هنا أن تعتقد من دون دليل، أن تعتقد في صحة شيء من دون برهان، أن تكون صاحب إيمان. قد يتطلَّع البعض إلى العثور على الله هنا (بذلك فإن هذا المكان هو جنة من نوعٍ ما). أما أولئك العلماء الذين ينكرون وجود الله قد يتطلعون بدلًا من ذلك إلى عدم العثور على أي شيء هنا على الإطلاق، إذ إنه (بالنسبة إليهم على الأقل) يعتبر استحضار شيء من العدم عن طريق آليات الفيزياء وحدها الانتصار النهائي للاستدلال العلمي على الخرافة الدينية (إلا أن هذا فعليًّا نوعٌ آخر من الميتافيزيقا).

قد تتضمن مثل هذه الميتافيزيقا رؤية كبرى للواقع وسببه وطبيعته ومصيره النهائي. إلا أنها تُعنى في العادة ببعض ملامح الواقع الأكثر

(١) شخصيات من عالم ستار تريك Star Trek. (المترجم).

دنيوية، وبالأشياء في نفسها و«بالمسامير والصواميل» اللازمة لتجميع شذرات الواقع والإمساك بها معًا.

قد تتشكك في أن العلماء يحتاجون فعليًّا إلى هذا المكان. لماذا قد يرغبون في المجيء إلى هنا؟ أليس من المؤكد أن لديهم كل ما يحتاجون إليه في الواقع التجريبي؟ إذن دعني أحاول أن أوضح لك لماذا يجد العلماء أنفسهم بحاجة إلى القيام بزياراتٍ متكررة لهذا المكان.

كما رأينا في الفصل الأول، كان فيزيائيو أوائل القرن العشرين مجبرين على انتزاع ميكانيكا الكم من الميكانيكا الكلاسيكية التي سبقتها، يسوقهم إلى القيام بذلك دليلٌ غير قابل للتفسير. ونتيجة ذلك تغيَّر إدراكنا للمفاهيم الفيزيائية على غرار الزخم الخطي بصورة عميقة، لا رجعة فيها، إلا أنه جرى الاحتفاظ ببعض المفاهيم الكلاسيكية.

أولًا، تتطلَّب الميكانيكا الكلاسيكية التي ورثناها من نيوتن مكانًا وزمانًا مطلقين. هي معضلة، لأنه إذا وُجِد مكانٌ مطلقٌ فسوف يشكِّل حاوية عجيبة، من المحتمل أن لها أبعادًا لا نهائية، بداخلها مُوَقِّت كوني عجيب، يشير إلى زمانٍ مطلقٍ. يستلزم ذلك نقطة ذات إطلالة مميزة، من الممكن النظر منها على الكون المادي برمته بالأسفل، من «منظور ربوبي» على كل الخلق. رفض ماخ الإمبيريقي المتطرف هذا المفهوم أيضًا، ومن الممكن القول إن أينشتاين تخلَّص من هذا المفهوم (أخيرًا) في عام ١٩١٥ في نظريته النسبية العامة، التي يظهر المكان والزمان فيها على هيئة متغيرات ديناميكية.

إن المكان والزمان المطلقين -أو بالأحرى الزمكان المطلق- بنية ميتافيزيقية. ولا تزال تلك البنية قائمة إلى الآن، جئنا بها من دون تغيير كبيرٍ من الميكانيكا الكلاسيكية وجعلناها خلفية ميكانيكا الكم، إذ نتخيل أن الأحداث الكمية تجري من أمامها. يقبل كلٌّ من يمارس ميكانيكا الكم -سواء عرف ذلك أم لم يعرف- ذلك التصور عن الواقع ويعتبر الواقع مركبًا من زمكان مطلق. يقبل ذلك من دون الرجوع إلى أي دليل تجريبي، تنهض هذه الحقيقة (أو هذا القبول) من دون الحاجة إلى برهان.

تجد على طول هذه الشواطئ التصورات الميتافيزيقية المجردة مبعثرة، تلك التصورات اللازمة لتشحيم آلية العلم الرياضية. وهي أشياء على غرار الدائرة المثالية والكرة المثالية والنقطة الصغيرة متناهية الصغر والزاوية متناهية الصغر والخط المستقيم اللا نهائي والنهاية الطبيعية، وذلك إلى جانب أشياء أخرى عديدة. لا توجد هذه التصورات في الواقع التجريبي، إلا أننا من دونها سوف نعاني من أجل ممارسة أي علم مؤسس على الرياضيات، مهما كان[١].

تتجمع كلُّ هذه الأشياء في حزمٍ من تصورات ميتافيزيقية مسبقة عند العلماء الذين يقضون ولو أقل القليل من الوقت هنا. يلخص ذلك كيفية تفكير العلماء في الواقع ونوع الأشياء التي يظنون أنه يجب أن يمتلكها. يُضَمِّنون تصورات مسبقة تتأسس على مفاهيم تجريدية على غرار الجمال أو التناظر أو الأناقة أو البساطة. يظهرون قناعات تذهب إلى

---

(١) من أجل نقاش أكثر تفصيلًا لهذا الجانب لاستخدام الرياضيات في الفيزياء، أوصي بشدة بكتاب: **Giovanni Vignale, The Beautiful Invisible: Creativity, Imagination, and Theoretical Physics (Oxford University Press, Oxford, 2011).**

أن التفسيرات النظرية يجب أن تكون «طبيعية»، أو إلى أن الواقع يجب أن يكون حتميًا، لا مناص من أن تتبع النتيجة فيه السبب. أو إلى أن ثمة «قوانين طبيعية» حصينة ويجب احترامها دائمًا (على سبيل المثال، قانون الحفظ) أو أن الزمكان يجب أن يكون مطلقًا[1].

نعثر على الجانب الآخر من البحر على شواطئ الواقع التجريبي. إنه واقع خبرتنا اليومية، لذلك ينبغي لي الاعتذار إذا كنت قد وجدت أنني رسمته في هيئة كئيبة، لا تُحتمل. بعيدًا عن أي شيء آخر، أردت إظهار التفاوت بين الواقع التجريبي وبين فتنة وإغراء رمال ونباتات الواقع الميتافيزيقي، كما أنني مشغولٌ بحديث همفري ديفي إلى مايكل فاراداي الفتى رهيف الطبع، كان فاراداي قد عُيِّن حديثًا في ١ مارس ١٨١٣ في منصب بمعهد لندن الملكي، عندما حدَّثه ديفي عن أن العلم سيدة خشنة[2].

لذلك فإن شواطئ الواقع التجريبي صخرية متكسرة، تقصفها الزوابع والعواصف وتضربها الأمواج. إنها موطن الحقائق التجريبية القاسية -وربما الموحشة، موطن غير مضيافٍ، موطن الأعداد والتأثيرات، موطن عند القيام فيه بهذا نحصل على ذلك. نكتشف هنا بالطبع كيف تظهر الطبيعة فعليًا. توجد هنا تجمعات الحقائق الموحشة التي تقتل

(١) كمثالٍ على عالم ذهب إلى أن الزمكان مطلقٌ، انظر كتاب بريان جرين (نسيج الكون: المكان والزمان ونسيج الواقع) Brian Greene, The Fabric of the Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality (Allen Lane, London, 2004), p. 75 (where he writes: 'spacetime is a something').

(٢) انظر http://www.rigb.org/blog/2013/march/faradayappointment

النظريات الجميلة (بحسب توصيف بنيامين فرانكلين)، إنه المكان حيث نشهد «تراجيديا العلم العظيمة - نحر الفرضية الجميلة على يد الحقيقة القبيحة» (بحسب توصيف توماس هكسلي)[1]. إنه المكان حيث يتوجَّب على العلماء تنحية مشاعرهم وانحيازاتهم وممارسة عقلانية حسابية باردة - إنهم أقرب لسبوك منهم لكيرك بالتأكيد.

ومع ذلك لا تفكر لوهلة أنه ما من مساحة للميتافيزيقا، حتى هنا. نحن مجبرون على القبول بأنه ما من رصد ممكن وما من تجربة ممكنة ما لم يكن لدينا تصورٌ بخصوص ما ننظر إليه أو نجري عليه التجربة. لا يعني هذا بالطبع أننا لا نستطيع اكتشاف أشياء جديدة أبدًا. كلُّ ما هنالك أنه من المستحيل القيام برصد أو إجراء تجربة خارج سياق نظرية داعمة، إلا أن الرصد أو التجربة قد يسفران عن تغيير النظرية أو استبدالها بالكامل.

اقترح الفيزيائي والفيلسوف الفرنسي بيير دويم ذات مرة أن ندخل إلى معمل ونطلب من عالم يُجري بعضَ التجارِب الأساسية على التوصيلية الكهربية أن يشرح ما يفعله[2]:

---

(1) Thomas Huxley, 'Biogenesis and Abiogenesis', Presidential Address to the British Association for the Advancement of Science, 1870, Collected Essays: Discourses Biological and Geological, volume 8, p. 229. See: https://mathcs.clarku.edu/huxley/CE8/B-Ab.html. «خشن» و«قاسٍ» و«قبيح» - من الواضح أنني لستُ أول من فكر في أن الواقع التجريبي مكانٌ متواضع روحانيًّا للغاية.

(2) Pierre Duhem, The Aim and Structure of Physical Theory, English translation of the second French edition of 1914 by Philip P. Wiener (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1954), p. 145.

هل سوف يجيبنا قائلًا: «أدرس اهتزازات قطعة الحديد التي تحمل هذه المرآة؟» لا، سوف يخبرك أنه يقيس المقاومة الكهربية لملف. إذا أصابتك الدهشة، وسألته عن معنى هذه الكلمات، وعن صلتها بالظواهر (فينومينا) التي يلمسها والتي تلمسها في الوقت نفسه، فسوف يجيبك أن سؤالك يتطلَّب بعض الشروح الطويلة، وسوف يقترح عليك الحصول على برنامج دراسي في الكهربية.

إن الحقائق التجريبية لا تخلو من النظريات أبدًا. لا يمكن ألا تتلوث أبدًا بنظرية ما أو الأخرى. بينما نشيِّد فهمنا النظري للظواهر (الفينومينا) طبقة فوق طبقة، تتسرب مفاهيم نظرياتنا إلى اللغة التي نستخدمها لوصف الظواهر نفسها. تصبح الحقائق والنظرية متشابكة بصورة لا فكاك منها: يعتمد ما نرصده في الواقع التجريبي بقدر ما على الكيفية التي ننظر بها إليه.

لا عجب أن أرباب الوضعية المنطقية فشلوا.

يفصل بين شواطئ الواقع الميتافيزيقي والواقع التجريبي بحرٌ. وكما أوضحت في السابق، إذا كنَّا بصدد إسباغ معنى على الحقائق التجريبية عن طريق تطوير تفسيرات تُعَمِّق فهمنا، يتوجَّب علينا العثور على طريقة لجمع تصوراتنا المسبقة والحقائق معًا. علينا خلق بعض الشد والجذب فيما بينهما. هكذا نبحر بسفينة العلم، جالبين معنا كلَّ تصوراتنا الميتافيزيقية المسبقة، ومستغلين معرفتنا بالحقائق التجريبية من أجل تطوير تمثل عملي للواقع، أو من أجل تطوير ما قد نسميه نظرية علمية. إن هدفنا من وراء عبور بحر التمثل العثور على سبيل إلى استيعاب كل

من التصورات المسبقة والحقائق في بنية مفردة من رياضيات نموذجية (إلا أنها غير قاصرة عليها).

ثمة سبلٌ عديدة مختلفة للقيام بالرحلة عبر البحر، وهو ما يطرح أنه من الممكن بالفعل تطوير العديد من النظريات المختلفة، يخالط كلًّا منها مزيجٌ مختلف من التصورات المسبقة، وتوفر كلٌّ منها تفسيراتٍ مناسبة تمامًا للبيانات التجريبية. يعرف فلاسفة العلم هذا باسم نقص تحدد النظرية بواسطة البيانات undetermination of theory by data. إنَّ هذا محبطٌ قليلًا لأي أحد يظن أن دور العلم نقل وصف «حقيقي» للواقع، لا يشوبه إبهام، وغير قابل للمساءلة وثابت على مرِّ الزمن.

اتضحت الصورة أمامك الآن. يرضى الفلاسفة بالتأمُّل والجدال حول طبيعة الواقع الميتافيزيقي، ما الغاية منه، وما إذا كان له أي معنى فعلي أو دلالة. إنهم فلاسفة، ولا يشغلون أنفسهم بأعمال الإبحار بسفينة العلم إلى أعالي البحار[١]. بالمقابل، هذا هو ما يفعله العلماء. تذرع السفينة بحر التمثُّل ذهابًا وإيابًا، تُحَسِّن التصورات الميتافيزيقية المسبقة هنا وتجمع حقائق تجريبية (غير محايدة بالكامل) هناك، تسافر يحدوها الأمل في نظرية ناجحة.

لذا دِعنا نرى كيف قد ينجح ذلك.

* * *

(١) إلا أنه لدى فلاسفة العلم بعض الأشياء التي قد يقولونها عن تصميم وبناء السفينة وكيفية قيادتها، وأدواتها وخرائطها الملاحية، وطبيعة الرحلة ذهابًا وإيابًا.

الفصل الثالث

الإبحار في بحر التمثُّل

كيف تنجح النظريات العلمية (وأحيانًا لا تفعل)

نميل جميعًا إلى استخدام كلمة «نظرية» بشكلٍ فضفاضٍ إلى حدٍّ ما. لديَّ نظرية بخصوص أسباب تصويت المواطنين البريطانيين بفارقٍ بسيطٍ لصالح مغادرة الاتحاد الأوروبي في الاستفتاء الذي عُقِد في يونيو ٢٠١٦، لديَّ كذلك نظرية بخصوص النجاح الصارخ الذي حقَّقه دونالد ترامب في السباق على منصب الرئيس الخامس والأربعين للولايات المتحدة الأمريكية مؤخرًا في ذلك العام. يمكننا جميعًا الاتفاق على أنه لا يهم مدى معقولية هذه النظريات، فهي «مجرد نظريات».

إلا أنَّ النظريات العلمية الناجحة تعني ما هو أكثر من ذلك بكثيرٍ جدًّا. يبدو أنها تخبرنا بشيء عميق الدلالة عن الكيفية التي تعمل بها الطبيعة. إن النظريات على غرار نظام نيوتن للميكانيكا ونظرية دارون للتطور ونظريتيْ أينشتاين للنسبية الخاصة والعامة وبالتأكيد نظرية الكم مقبولة بشكلٍ واسعٍ، ونعتبر تمثلات «حقيقية» للواقع على الوجه الأرجح، تشكِّل الأسس التي نسعى عن طريقها إلى فهم كيف جاء الكون إلى الوجود، وكيف وصلنا إلى هنا، وكيف صار في إمكاننا بناء نظريات

حول ذلك. يعتمد كثيرٌ مما نُسَلِّم به في ثقافتنا العلمية التقنية الغربية المعقدة على التطبيق الموثوق به لعددٍ من النظريات العلمية، نمتلك أسبابًا جيدة للاعتقاد فيها.

في مقالٍ منشور حديثًا على شبكة الإنترنت في النيويورك تايمز أوضح كينيث ميللر عالم البيولوجيا الخلوية أن النظرية العلمية لا تعني حدسًا أو تخمينًا. إن النظرية هي نظام تفسيرات يربط حزمة كاملة من الحقائق معًا، لا يفسر تلك الحقائق فقط، بل يتنبأ بما قد تجده عند القيام بأرصاد وتجارب أخرى[1].

هذا كلُّه جيد وعظيم، لكن كيف يحدث ذلك؟ من أين تأتي النظرية العلمية؟ وكيف تتشكَّل خلال المواجهات التي تنشأ بين التصورات الميتافيزيقية المسبقة والحقائق التجريبية؟ كيف تكتسب قبول المجتمع العلمي وثقته؟ وكيف ينبغي لنا تفسير ما تقدمه النظرية (وهو الأمر الأهم بالنسبة إلينا هنا)؟

بمعنى آخر، ما الأمور المتداخلة مع إبحار سفينة العلم عبر بحر التمثل؟

قد تقودك بداهتك الأولى إلى فهمٍ معتادٍ إلى حدٍّ كبير لما يشار إليه في العموم بوصفه «نظرية علمية». قد تظن أن العلماء يبدؤون بجمع الكثير من البيانات التجريبية، ثم يبحثون عن أنماطٍ. قد تطرح الأنماط

(١) Carl Zimmer, 'In Science, It's Never "Just a Theory" 'New York Times, 8 April 2016. Available at http://www.nytimes.com/2016/04/09/ science/in-science-its-never-just-a-theory.html?_r=0

احتمالية وجود علاقة سبب ونتيجة أو قانون طبيعي يقبع تحت السطح، يوجه أو يحكم ما نرصده.

مستلهمين المجاز الذي صوَّرناه، يسلِّح العلماء أنفسهم بشحنة من البيانات التجريبية، ويبحرون نحو شواطئ الواقع الميتافيزيقي. يجمعون هنا تصوراتٍ مسبقة عن الواقع على صلة بالبيانات التي يرغبون في فهمها، ربما تتضمن مفاهيم مألوفة على غرار الزمان والمكان، وكيانات مألوفة (لكنها غير مرئية) على غرار الفوتونات والإلكترونات، وأشياء نظن أننا نعرف سلوكها وخواصها بالفعل.

إذا كانت تلك المفاهيم والأشياء تمثِّل أنماطًا في البيانات الفيزيائية، فسوف يستخدم العلماء الرياضيات في العادة لجمع تصوراتهم المسبقة في بنية نظرية منهجية، تتضمن المكان والزمان والكتلة والطاقة وربما تتضمن خواصًّا أخرى على غرار الشحنة واللف المغزلي والنكهة واللون. ومما يستحق الانتباه أن البنية الجديدة تمدُّ العلماء بالصلات التي يحتاجون إليها.

تقول النظرية عندما نفعل هذا، نحصل على ذلك النمط، وهذا متسقٌ مع ما رُصِد. ثم يمضي العلماء نحو ما هو أبعد. يضعون ثقتهم بصحة البنية، ويستدلون على أنه عند قيامهم بأمرٍ آخر، فلا بُدَّ أن يحدث شيء لم يرصدوه من قبل أبدًا (أو لم يفكروا في البحث عنه). يبحرون عائدين عبر البحر نحو شواطئ الواقع التجريبي كي يقوموا بالمزيد من الأرصاد أو كي يجروا المزيد من التجارب. عندما يُرصد حدوث هذا الشيء حقًّا، تكتسب النظرية مصداقية وقبولًا أكبر.

يعود الفضل في هذه النسخة من المنهجية العلمية القائمة على (مبدأ الاستقراء) إلى فرنسيس بيكون، تُوفيَّ بيكون بالتهاب رئوي بعد حياة عملية لامعة (وفضيحة علنية)، أصابه الالتهاب الرئوي بينما يحاول حفظ دجاجة عن طريق وضع الثلج من حولها. قد نشعر براحة كبيرة تجاه هذه النسخة من المنهجية العلمية، لقد بقيت هذه النسخة من دون تشكيك لمئات السنوات، لكن علينا الاعتراف أن العلم لا يعمل فعليًّا وفق هذه الطريقة.

إذا كانت قوانين الطبيعة الأبدية التي لا تتبدَّل تُبنى من خلال الاستدلال بالاستقراء، وتُبرر أو تتعدَّل بالشكل المناسب نتيجة التجربة أو الرصد، فإن فلاسفة بدايات القرن العشرين ذهبوا إلى أنه علينا قبول أن مثل هذه القوانين يستحيل أن تكون يقينية أبدًا.

افرض أننا قمنا بسلسلة طويلة من الأرصاد لغربان حول كل أنحاء العالم، نلاحظ أن كل الغربان سوداء، نستخدم الاستقراء لتعميم هذا النمط وتحويله إلى قانون: «كل الغربان سوداء»[١]. يقودنا هذا التنبؤ إلى أن الغراب التالي الذي سيتم رصده يجب أن يكون أسود أيضًا (وكذلك أي عدد من الغربان التي قد تُرصد مستقبلًا).

إلا أن علينا الاعتراف بأنه مهما كان عدد الأرصاد التي أجريناها

(١) على القراء أن يلاحظوا أن هذه ليست «مفارقة الغراب» الشهيرة، التي ابتكرها الفيلسوف الوضعي كارل همبل في أربعينيات القرن العشرين. لو أن كل الغربان سُود، فإن هذا يستلزم منطقيًّا أن أي شيء غير أسود (وكل شيء غير أسود) ليس غرابًا. إلا أنه في الوقت الذي لن نتردد في قبول رصد غراب أسود آخر كدليل في صالح القانون، سوف نتردد بالتأكيد في قبول رصد تفاحة خضراء كدليل في صالح القانون.

تبقى دائمًا احتمالية رصد استثناء للقاعدة قائمة، غراب من لون مختلف، يعارض القانون، ويستلزم التخلص منه أو مراجعته. قد تكون احتمالية العثور على غراب ليس أسود اللون شديدة الضآلة، إلا أنه لا يمكن اعتبارها صفرًا أبدًا، ولذلك لن نتأكد أبدًا من أن قانون الغربان السوداء سوف يظل قائمًا خلال كل الأرصاد التي تُجرى في المستقبل. إنه استنتاجٌ تعضده خبرات المستكشفين الأوروبيين -الذين ربما صاغوا قانونًا مماثلًا «قانون البجع الأبيض»، إلى أن رصدوا بجعًا أسود (Cygnus atratus) في بحيرات وأنهار أستراليا ونيوزيلندا.

صاغ الفيلسوف برتراند راسل الأمر على النحو التالي: «الرجل الذي أطعم الدجاجة طوال حياتها، لوى عنقها في النهاية، ما يكشف عن أن منظورًا أفضل بخصوص اتساق الطبيعة كان سيفيد الدجاجة»[(١)].

ذهب كارل بوبر إلى أنه لا يمكن التغلُّب على هذه المعضلات، ولذلك رفض تمامًا الاستقراء باعتباره الأساس الذي ينبني عليه المنهج العلمي. صاغ بوبر رؤيته في كتابين رئيسيين (منطق الكشف العلمي The Logic of Scientific Discovery) الذي نُشِر لأول مرة في ألمانيا في عام ١٩٣٤، و(التخمينات والتفنيدات Conjectures and Refutations) الذي نُشِر في عام ١٩٦٣. ذهب إلى أن العلم يمضي بدلًا من ذلك من خلال ابتكار فرضيات إبداعية، ومنها نستدل على النتائج التجريبية بعد ذلك. إن العلماء على وعي ببعض المعضلات أو الفجوات البارزة فيما

---

(١) Bertrand Russell, The Problems of Philosophy (Oxford University Press, Oxford, 1912), p. 35.

يتعلق بفهمنا للطبيعة، لا يبدأ العلماء بحمولات من البيانات التجريبية بل يقصدون شواطئ الواقع الميتافيزيقي. يستحضرون بعض الأفكار الجريئة (والمجاوزة للحدود أحيانًا) بخصوص كيف هي الطبيعة، ثم يستدلون على النتائج خلال رحلة العودة عبر بحر التمثُّل.

ما الذي يحدث بعد ذلك عندما نبلغ شواطئ الواقع التجريبي؟ هذا سهلٌ: تُختَبر النظرية، تُعرَّض للحقائق الصعبة القاسية التي لا ترحم. يذهب بوبر إلى أنها تبقى نظرية علمية وثيقة الصلة ومفيدة، إذا لم تُكَذِّبها البيانات النظرية، ولو مرة واحدة فقط (إذ يُكذِّب رصد بجعة سوداء منفردة «قانون البجع الأبيض»).

يمكنني المضي أبعد قليلًا من بوبر والذهاب إلى أنه إذا كان الاختبار قائمًا على بيانات موجودة وعلى حقائق تجريبية نعرفها بالفعل، تُقبل النظرية مبدئيًا إذا كانت توفِّر تفسيرًا أفضل لهذه الحقائق بالمقارنة بأي بديلٍ متاحٍ. أما الأفضل من ذلك، إذا تنبّأت النظرية بما يمكن اختباره، ومن ثم دعمته بيانات الأرصاد والتجارب الجديدة، فحينها تُحتضن النظرية بشكلٍ أوسع على الأرجح[1].

صدقًا أشك في أن الكثير من العلماء قد يرغبون في الاعتراض على أي من هذا. يمكنني أن أقدِّم لك العديد والعديد من الأمثلة من تاريخ العلم، تبين لك أن هذه هي الطريقة التي يُنجز بها الأمر إلى حدٍّ كبيرٍ. إلا

(١) من غير المفاجئ أنه كلما كان التنبؤ مخالفًا للبداهة، راجع العلماء مصدر التنبؤ في حرص. يمضي الأمر على هذه الصورة: إن ذلك سخيفٌ - كيف تكون تلك الاحتمالية صحيحة؟ ماذا؟ هي صحيحة بالفعل؟ يا إلهي! ما هي النظرية مرة أخرى؟

أن هذا ليس كتابًا في التاريخ، لذلك سوف أقصر نفسي على مثال واحد فقط وثيق الصلة جدًّا بالموضوع.

رأينا في الفصل الأول أن أينشتاين كان القائد الفعلي لثورة الكم، إذ نشر فرضية كمات الضوء في «عامه الإعجازي» عام ١٩٠٥. تجدر الإشارة إلى أن أينشتاين لم يستقرئ فرضيته من أي بيانات متاحة. أدرك أينشتاين ببساطة وجود مشكلة تتعلق بالطريقة التي يفهم بها العلماء المادة والإشعاع الكهرومغناطيسي. اعتبروا المادة ذرات وجزيئات منفصلة واعتبروا الموجات الكهرومغناطيسية موجات متصلة. لم يتلاءم التوصيف العلمي السائد للمادة والضوء مع تصورات أينشتاين الميتافيزيقية المسبقة بخصوص ما ينبغي للطبيعة أن تكون عليه. وبينما كان في زيارته لشواطئ الواقع الميتافيزيقي، استحضر أن استنتاجات بلانك يجب تفسيرها كما لو كان الضوء نفسه يتركب من كمات منفصلة.

بعد ذلك أبحر أينشتاين عبر البحر، مقدِّمًا كمات الضوء الخاصة به في صورة نظرية، تتنبأ ببعض نتائج التأثير الكهروضوئي، أما الباقي فتاريخ – كما يقولون.

اجتازت فرضية كمات الضوء الاختبار، لكنها ظلَّت خلافية كما رأينا (قد يكون العلماء عنيدين جدًّا). بعد سنوات قليلة من التجارب على التأثير الكهروضوئي أوضح آرثر كومبتون وبيتر ديباي أن الضوء يضرب الإلكترونات ويدفعها، مع تغير يمكن توقعه في تردد الضوء (وبالتالي طاقته). أظهرت هذه التجارب أن الضوء يتكوَّن فعليًّا من

جسيمات متحركة مثل مقذوفات صغيرة، وتدريجيًّا صارت كمات الضوء أقل إثارة للخلاف وموضع قبولٍ أكبر.

تُعرف مقاربة بوبر للعلم بالمنهج «الفرضي الاستنباطي» hypothetico-deductive. يفتقر الاصطلاح إلى الجزالة، إلا أنه يعني في جوهره أن العلماء يعتمدون على كل تصوراتهم الميتافيزيقية المسبقة من أجل بناء فرضية بخصوص كيفية عمل الطبيعة (أو «تخمين» ذلك)، ومن ثم يستنبطون نظرية منهجية، تخبر بما قد يتوقعون العثور عليه في الأرصاد والتجارب الإمبيريقية. يتقدَّم العلم إذن من خلال المواجهات التي تحدث بين النظرية والحقائق، بينما تبحر السفينة بين الشواطئ. هذه الرحلة ليست رحلة في اتجاه واحد (ذهاب بلا عودة) – ترتحل السفينة مرارًا ذهابًا وعودة، أما تلك التصورات المسبقة ذات الصلة التي تستطيع البقاء فتصبح مرتبطة بإحكامٍ وبشكلٍ لا ينفصم بالنظرية (وبالأرصاد التجريبية كذلك، كما رأينا). وبهذه الطريقة تصبح الميتافيزيقا ذات الصلة «طبيعية» أو «معتادة»، كما تصبح مبررة بسبب نجاح النظرية الناتجة[١].

ومما يستحق الذكر ولو على عجالة أن التصورات المسبقة والبيانات والسفينة نفسها تتهيَّأ وفق السياقات التاريخية والثقافية أو المنظور التاريخي والثقافي. ثمة عباراتٌ في كتاب نيوتن (أصول

---

(١) من أجل إطلالة على البرنامج الفلسفي للميتافيزيقا المُطبَّعة، naturalized metaphysics انظر: James Ladyman and Don Ross, with David Spurrett and John Collier, Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized (Oxford University Press, Oxford, 2007).

الفلسفة الطبيعية) Principles of Natural Philosophy المنشور في عام ١٦٨٧، تشير إلى دور الله في حفظ النجوم متباعدة، وهو تصوُّر ميتافيزيقي مسبق غير معتادٍ في العلم المعاصر. أخبرتني مكيلا ماسيمي الفيلسوف المعاصر في نقاشٍ يقوم على تشبيهي المجازي: «إن الرحلة انطباعية دائمًا، نبحر بسفينتنا مستخدمين الأدوات التي توفرها تقنياتنا ونظرياتنا ومصادرنا التجريبية الحالية فقط (البوصلة وأي شيء آخر مهما كان). ولذلك فإن أي ذهابٍ وإيابٍ بين شواطئ الواقع التجريبي وبين الأطروحات الميتافيزيقية تحكمه وتوجِّهه كينونتنا وكذلك تاريخنا العلمي، وهو الحاكم الأهم»[١] قارن بين رحلة بحرية كاملة لسفينة طويلة من القرن السابع عشر وبين خط رحلات معاصر يمرُّ بالمحيط.

لا يوجد من حيث المبدأ أي قيدٍ على طبيعة الفرضيات التي قد يأتي بها العلماء خلال زياراتهم المتكررة لشواطئ الواقع الميتافيزيقي. قد يدفعك ذلك إلى التساؤل: كيف يختلف العلم إذن بأي شكل عن أي تخمين جامح؟ لو أنني طرحتُ أن ثمة قوة ملغزة في الطبيعة تحكم أنشطة حياتنا اليومية وتتوقف على علامات الميلاد، بالتأكيد سوف نتفق جميعًا على أن هذا ليس علمًا. ماذا إذا طرحتُ أن المِثل يعالج مِثله similia similibus curentur، وأننا عندما نخفِّف المواد التي تتسبَّب في إمراض البشر بمقدار ١٠١٢ (أو ١٠٦٠) فإنها تتحوَّل إلى علاجات فعالة؟ هل هذا علمٌ؟ أم أنه بضاعة مغشوشة؟ ماذا إذا بلغت أقصى التصورات الميتافيزيقية المسبقة وطرحت أن الله هو السبب الذكي لكل

---

(١) Michela Massimi, personal communication, 25 March 2019.

حياة على كوكب الأرض، وكل ما ندَّعي بالخطأ أنه نتيجة للتطور عن طريق الانتخاب الطبيعي هو فعليًا تصميمٌ جليلٌ أبدعه الله؟

قد تدفعك غريزتك إلى رفض التنجيم والهميوباثي[1] والتصميم الذكي بوصفها علومًا زائفة، في أفضل الأحوال، لكن ما سبب ذلك؟ إنها تتضمن في النهاية فرضيات قائمة على الميتافيزيقا، إذ تُستنبط منها مبادئ نظرية معينة، ومن الممكن القول إنها تقوم بتنبؤات يمكننا تعريضها لاختبار تجريبي. يمكننا أن نرى في الحال أننا إذا كنَّا سوف نرسم خطًّا بين النظريات التي نعتبرها علمية وبين تلك التي نعتبرها علمًا زائفًا أو ميتافيزيقا خالصة وذلك بعد أن انتبهنا لدور الميتافيزيقا في التنظير العلمي، فإننا بحاجة إلى ما هو أكثر، إننا بحاجة إلى معيارٍ للتمييز.

طرح أرباب الوضعية المنطقية استخدام «التحقق» verification من أجل هذا الغرض. إذا أمكن من حيث المبدأ التحقق من النظرية عن طريق اختبارات الرصد والتجريب، إذن فمن الممكن اعتبارها نظرية علمية. إلا أن مبدأ الاستقراء كان كذلك في القلب من برنامج الوضعيين، ولم يكن أمام بوبر أي بديلٍ مع رفضه للاستقراء سوى رفض التحقق كذلك.

منطقيًّا، إذا لم يوفِّر الاستقراء أي ضمانات فيما يتعلَّق باتساق الطبيعة (ويمكن لدجاجة راسل أن تشهد على ذلك)، فإن التحقق المتواصل من النظريات لا يوفِّر ضماناتٍ أيضًا. تميل النظريات إلى أن تكون قابلة

---

(١) الهميوباثي، تقنية علاج تذهب إلى أن المِثل يعالج مثله، وبالتالي فكميات صغيرة للغاية من المادة التي تسبِّب المرض في الشخص السليم قد تؤدي إلى شفاء ذلك المصاب بالمرض. (المترجم).

للتحقُّق منها إلى أن يأتي يومٌ لا تصبح كذلك.

وكما رأينا مسبقًا، ذهب بوبر إلى أن ما يميز النظرية العلمية عن العلم الزائف والميتافيزيقا الخالصة هو إمكانية تكذيب النظرية العلمية عند تعريضها للبيانات التجريبية. بمعنى آخر، تُعتبر النظرية نظرية علمية إذا كان في الإمكان البرهنة على خطئها.

إنه تحوُّل ضئيلٌ إلى حدٍّ كبيرٍ، لكنه فعَّال جدًّا. يقوم التنجيم بتنبؤات، إلا أنها تنبؤات عامة ومفتوحة على تفسيرات عريضة عن عمدٍ. كتب بوبر: «إنهم عرَّافون نمطيون يحتالون عن طريق التنبؤ بأشياء فضفاضة للغاية بحيث لا تكاد تفشل التنبؤات: وبذلك لا يمكن دحضهم»[1]. إذا أمكن للمنجم أن يعيد تفسير نبوءته بسهولة عندما يواجَه بدليل قادر على تكذيبه مخالف لما قال، فإن هذا ليس علميًّا. يمكننا العثور على سبل عدة لنقد مبادئ الهميوباثي ورفضه بوصفه علمًا زائفًا، إذ إنه لا يتأسس على شيء (أو يتأسس على القليل للغاية) في فهمنا الحالي للطب الغربي المبني على الدليل - فهو نظرية لم تخضع للتدقيق. إلا أننا حتى لو قبلناها من دون تمحيص، فعلينا التسليم بأنها تفشل في كل الاختبارات - لا نجد في التجارب الإكلينيكية ما يدل على أن لعلاجات الهميوباثي فعالية تفوق تأثير البلاسيبو (إعطاء المريض مادة وهمية على أنها علاج). أما أولئك الذين يجادلون في عناد بخصوص فعاليتها، فلا يمارسون العلم.

---

(١) Karl Popper, Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge (Routledge & Kegan Paul, London, 1963), p. 49.

ولا يهم مقدار رغبتنا في الاعتقاد أن الله صمم كل الحياة على الأرض، علينا قبول أن التصميم الذكي لا يطرح من لدنه أي تنبؤات قابلة للاختبار. إنه ببساطة بديلٌ مفاهيمي للتطور باعتباره سبب تعقُّد الحياة المدهش. يستحيل تكذيب التصميم الذكي، مثلما يستحيل على أي أحد إثبات وجود أو عدم وجود الله. ليس التصميم الذكي بنظرية علمية، إذ يغلب عليه ببساطة المحتوى الميتافيزيقي.

للأسف، ليست هذه هي القصة الكاملة بعد. دائمًا ما يتضح أن الأمور كانت أروع من أن تُصَدَّق. تُعلِّمنا دروس التاريخ أن العلم أكثر فوضوية بكثيرٍ من أن يقبل معيارًا بسيطًا للتميز. إن العلم في جوهره هو سعي بشري في النهاية، ومن المحتمل أن البشر كائنات لا يمكن التنبؤ بها. فعلى الرغم من وجود العديد من الأمثلة على النظريات العلمية المُكَذَّبة والفاشلة على مر التاريخ، فإن العلم لا يتقدَّم عن طريق عملية تكذيب لا نهائية. على سبيل المثال: عندما استُخدمت ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية ونظرية الجذب العام للتنبؤ بمدار كوكب اكتُشِف حديثًا في عام ١٧٨١ يُدعى أورانوس، وُجِد أن التنبؤات خاطئة، إلا أنها لم تُعتبر دلالة على فشل بنية الميكانيكا الكلاسيكية والجذب.

تذكر أنه من المستحيل فعليًّا ممارسة أي شكلٍ من أشكال العلم من دون الميتافيزيقا، من دون بعض الأشياء التي نُجبر على قبولها على محملها الظاهري من دون برهان. تنبني النظريات العلمية على مفاهيم رياضية مجردة على غرار الجسيمات النقطية point-particles أو الأجسام الجاذبة التي تُعامَل كأن كتلتها بالكامل مكدسة في مراكزها.

إذا فكرنا في الطريقة التي تُطَبّق بها قوانين نيوتن بالفعل عمليًا، عند حساب المدارات الكوكبية على سبيل المثال، نجد أنفسنا مجبرين على التسليم بأنه من غير الممكن تطبيقها من دون سلسلة كاملة مما يُطلَق عليه الفرضيات أو الظنون المساعدة.

يُنَص على بعض هذه الظنون لكن البعض الآخر يظل مفهومًا ضمنيًا. من الواضح أننا إذا طبَّقنا ميكانيكا نيوتن على الكواكب في النظام الشمسي، فنحن نفترض -من ضمن أشياء أخرى- أن معرفتنا بالنظام الشمسي كاملة وأن بقية الكون لا يتداخل معه. كتب المُنَظِّر المعاصر لي سمولين في كتابه الحديث «ولادة جديدة للزمن» Time Reborn: «مَكَّن المنهج الخاص بقصر انتباهنا على جزء صغير من الكون الفيزياء من النجاح منذ عصر جاليليو، أُطلق عليه (ممارسة الفيزياء في صندوق)»[1].

تتمثل واحدة من تبعات ممارسة الفيزياء في صندوق في أنه عندما يُكَذِّب الدليل التجريبي التنبؤات، لا يكون السبب واضحًا أبدًا. ربما يكون السبب أن النظرية خاطئة، إلا أن السبب قد يعود ببساطة إلى خطأ واحد أو أكثر من الافتراضات المساعدة. لا يخبرنا الدليل بالسبب من بين الاحتمالين. هذه أطروحة دوهيم - كواين، على اسم الفيزيائي والفيلسوف بيير دوهايم والفيلسوف ويلارد فان أورمان كواين.

وفعليًا قاد البحث في إشكالية مدار أورانوس إلى واحدٍ من الافتراضات المساعدة، لقد حُلَّت المسألة ببساطة عن طريق تكبير

(١) Lee Smolin, Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe (Penguin Books, London, 2013), p. 38.

الصندوق قليلًا. طرح كلٌّ من جون آدامز وأوربان لوفيرييه بشكلٍ مستقلٍ أحدهما عن الآخر أن ثمة كوكبًا ثامنًا في النظام الشمسي غير مرصودٍ بعد، يشوِّش على مدار أورانوس. اكتشف يوهان جال في عام ١٨٤٦ الكوكب الجديد على مبعدة من مكانه المتوقع بما يقل عن درجة واحدة، سُمِّي الكوكب نبتون فيما بعد.

اكتسب لوفيرييه الجرأة من نجاحه، ما دفعه إلى استخدام المنطق نفسه من أجل حل معضلة فلكية أخرى، ليست المدارات الكوكبية أهاليج تامة. إذا كانت أهاليج تامة، فإن أقرب موضع لأي كوكب من الشمس (يطلق عليه الحضيض الشمسي) سوف يكون ثابتًا، إذ يمر الكوكب دائمًا عبر النقطة نفسها في كل مرة يدور فيها. إلا أن الأرصاد الفلكية أظهرت أنه مع كل دورة يتغير الحضيض الشمسي قليلًا، أو يبادر بالتقدُّم. كان مفهومًا أن كثيرًا من مبادرة الحضيض الشمسي المرصودة يعود إلى الشد الجذبوي المتراكم من كل الكواكب الأخرى في النظام الشمسي، وهي تأثيرات يمكن التنبؤ بها باستخدام جاذبية نيوتن.

إلا أنه بالنسبة إلى كوكب عطارد، الكوكب الأقرب إلى الشمس، فالمتوقع أن تكون «مبادرة الحضيض الشمسي النيوتنية» ٥٣٢ ثانية قوسية في القرن[1]، إلا أن مبادرة الحضيض الشمسي المرصودة أكبر من ذلك، إذ إنها ٥٧٥ ثانية قوسية في القرن، بفارق ٤٣ ثانية قوسية، وعلى

---

(١) الدائرة الكاملة ٣٦٠°، والدقيقة القوسية واحد من ستين من الدرجة الواحدة. أما الثانية القوسية فواحد من ستين من الدقيقة القوسية، وعلى ذلك فإن ٥٣٢ ثانية قوسية تمثل نحو ١٥ , ٠ من الدرجة.

الرغم من صغر الفارق فإنه يتراكم ويعادل دورة كاملة «إضافية» كل ثلاثة ملايين عام تقريبًا.

اقترح لوفيرييه وجود كوكب آخر، أقرب إلى الشمس من عطارد، وأصبح هذا الكوكب معروفًا باسم فولكان، بحث عنه الفلكيون بلا جدوى. ابتهج أينشتاين لدى اكتشافه أن نظريته النسبية العامة تتنبأ بإسهام «نسبوي» إضافي، يقدَّر ب ٤٣ ثانية قوسية في القرن، نتيجة انحناء الزمكان حول الشمس في المنطقة المحيطة بعطارد[١]. منح هذا الاكتشاف أينشتاين أقوى خبراته إثارة للوجدان طوال حياته العلمية: «كنتُ مفعمًا بالفرحة والإثارة لأيام»[٢].

يبدو من هذه القصة أنه لا تُهجَر النظرية إلا عندما تلوح في الأفق نظرية أفضل منها بوضوح كي تحل محلها. يمكننا أن نستنتج من هذا أن النظريات العلمية لا تُكَذَّب أبدًا، ومثلما كان الحال هنا، يتضح فقط في النهاية أنها أقل منزلة عند مقارنتها ببدائل منافسة. وحتى حينئذ، من الواضح أنه في إمكان النظريات المُكذَّبة مواصلة البقاء. نعرف أن قوانين نيوتن للحركة أقل منزلة من ميكانيكا الكم في العالم الميكروسكوبي للجزيئات والذرات والجسيمات دون الذرية، كما تنهار عندما تتحرك الأشياء مهما كان حجمها بسرعة الضوء أو بسرعات تقترب من سرعة

---

(١) يتعرض الحضيض الشمسي للكواكب الأخرى كذلك للمبادرة بسبب انحناء الزمكان، إلا أن هذه الكواكب أبعد من الشمس، لذلك فإن إسهامه في الأمر أقل وضوحًا.

(٢) Albert Einstein, letter to Paul Ehrenfest, 17 January 1916, quoted in Robert E. Kennedy, A Student's Guide to Einstein's Major Papers (Oxford University Press, Oxford, 2012). The quote appears on p. 214.

الضوء. ومع ذلك لا تزال قوانين نيوتن مرضية تمامًا عند تطبيقها على مواقف الحياة اليومية وعلى الأشياء المعتادة، ويستفيد منها الفيزيائيون والمهندسون بسعادة حتى وهم يعلمون أنها «غير صحيحة».

ارتأى فلاسفة العلم أن مثل هذه المعضلات غير قابلة للحل. وبالتالي تخلوا عن معيار القابلية للتكذيب الخاص ببوبر (إلا أنه -ويا للعجب- لا يزال يحيا في عقول الكثير من العلماء المشتغلين بالعلم). قاد زوال هذا المعيار بول فيرابند إلى أن يصبح بين فلاسفة العلم مثل لوكي[1]، إذ رفض مفهوم المنهج العلمي بالكلية وطور تفسيرًا أناركيًّا (فوضويًّا) لتقدم العلم. لقد ذهب إلى أن كل شيء مقبول everything goes في العلم. شجَّع العلماء على[2] أن يخطوا خارج الدائرة، وأن يختاروا بين أمرين، إما أن يخترعوا نسقًا مفاهيميًّا جديدًا، على سبيل المثال نظرية جديدة تصطدم بالنتائج الرصدية شديدة الرسوخ وتبلبل المبادئ النظرية الأكثر معقولية، وإما أن يستجلبوا مثل هذا النسق من خارج العلم، من الدين، من الميثولوجيا (الأساطير)، من تصورات غير الأكفاء أو هذيان المجانين.

يتقدَّم العلم بحسب فيرابند وفق أسلوب ذاتي تمامًا، ولا يجب منح العلماء أي وزن خاص: من حيث تطبيقهم للمنطق والاستدلال، لا يختلف العلم عن أي شكلٍ آخر من أشكال التساؤلات العقلانية. ذهب إلى أن معيار التميز لا يعدو كونه وضعًا للعلم على قاعدة تمثال، ويكبح التقدم في النهاية بعد أن يصبح العلم أكثر أيديولوجية ودوجمائية.

---

(١) لوكي Loki، إله الشغب والمشاكسة والاحتيال في الأساطير النوردية. (المترجم).

(٢) Paul Feyerabend, Against Method, 3rd edition (Verso, London, 1993), pp. 52–3.

أعلن الفيلسوف لاري لودان في عام ١٩٨٣ أن معضلة التمييز معضلة مستعصية على الحل، وبالتالي فهي معضلة زائفة[١]. ذهب إلى أن التمييز الفعلي يجب أن يكون بين المعرفة الموثوق بها والمعرفة غير الموثوق بها، بغض النظر عن مصدرها. إن اصطلاحات على شاكلة «العلم الزائف» و«غير العلمي» مجرد عباراتٍ فارغة، غايتها تحريك انفعالاتنا فقط»[٢].

حسنًا، حان الوقت لبعض التشوش. لا أقتنع بفكرة أن العلم فوضويٌّ في جوهره، وأنه بلا قوانين. يمكنني قبول أنه ما من قوانين ترتبط بالعمليات الإبداعية التي تجري على طول شواطئ الواقع الميتافيزيقي. هل تفضل الاستقراء؟ عليك به. هل تظن أنه من الأفضل استنباط الفرضيات ثم اختبارها؟ عظيم. إلا أنني أرفض على المستوى الشخصي البحث عن تصورات جديدة لدى الدين والميثولوجيا وغير الأكفاء والمجانين[٣]، لا يهتم أحد في النهاية كثيرًا بالكيفية التي جاءت بها المفاهيم والبنى النظرية ما دامت تؤدي إلى نظرية عاملة.

إلا أنه بالنسبة إليَّ على الأقل، يجب أن يكون ثمة فارقٌ بين العلم والعلم الزائف، وبين العلم والميتافيزيقا الخالصة.

---

(١) إنها حيلة فلسفية نموذجية.

(٢) Larry Laudan, 'The Demise of the Demarcation Problem', in R. S. Cohen and L. Laudan (eds), Physics, Philosophy and Psychoanalysis (D. Riedel, Dordrecht, 1983), p. 125.

(٣) لا يعود ذلك إلى شيء بالضرورة بيني وبين الدين والميثولوجيا وغير الأكفاء والمجانين كمصادر للفرضيات العلمية المحتملة. كل ما هناك أنني أشك بشدة في فعالية مثل هذه المقاربة.

ذهب عالم البيولوجيا التطورية الذي تحوَّل إلى الفلسفة ماسيمو بيجليوتشي إلى أنه «الوقت المناسب للفلاسفة كي يشتبكوا وينضموا إلى المعركة من أجل أن يقدموا إسهاماتهم الخاصة للتميز المهم للغاية -وشديد الحيوية أحيانًا- بين المعنى والهراء»[1].

إذن، إذا كنَّا لا نستطيع الاستفادة من القابلية للتكذيب كمعيارٍ للتفريق، ما الذي نستخدمه بدلًا منها؟ لا أظن أن لدينا أي بديلٍ فعلي سوى تبني ما أطلق عليه المعيار الإمبيريقي (التجريبي). لا يقوم التفريق على ثنائية نعم أو لا، خطأ أو صواب، أسود أو أبيض. علينا القبول بظلالٍ من الرمادي، كان بوبر نفسه (والذي لم يكن أخرق بالمناسبة) سعيدًا للغاية بقبول هذا[2].

من المستحيل أن يكون معيار التميز قاطعًا تمامًا، بل له درجات هو نفسه. ثمة نظريات قابلة للاختبار جيدًا ونظريات يمكن اختبارها بالكاد، ونظريات غير قابلة للاختبار. تلك النظريات غير القابلة للاختبار لا تهم العلماء الإمبيريقيين (التجريبيين)، يمكن وصفها بأنها ميتافيزيقية.

ذهب بعض العلماء والفلاسفة إلى أن «القابلية للاختبار» مكافئة من جميع النواحي «للقابلية للتكذيب»، إلا أنني لا أتفق معهم. لا تستلزم «القابلية للاختبار» إلا أن تكون النظرية على اتصالٍ بالدليل التجريبي أو تعد بأن تكون على اتصال بالدليل التجريبي. لا تقدِّم مطلقًا افتراضاتٍ

---

(١) Massimo Pigliucci, in Massimo Pigliucci and Maarten Boudry (eds), The Philosophy of Pseudoscience: Reconsidering the Demarcation Problem (University of Chicago Press, Chicago, 2013), p. 26.

(٢) Popper, Conjectures and Refutations, p. 346. The italics are mine.

بخصوص ما قد نقوم به بالفعل في ضوء الدليل التجريبي. إذا أثبت الدليل صحة النظرية، فذلك عظيمٌ - نحتفل ثم نبدأ البحث عن اختبار آخر. إذا فشل الدليل في دعم النظرية، قد نتفكر مليًّا بعض الوقت أو نعبث بالافتراضات المساعدة، في كلا الحالين، لدينا شيء نشتغل عليه، هذا هو العلم.

وبالعودة إلى المجاز الخاص بي، فإن النظرية القابلة للاختبار جيدًا هي نظرية يكون طريق العودة فيها عبر البحر نحو الواقع التجريبي مباشرًا. أما النظرية التي يمكن اختبارها بالكاد يكون طريق العودة الخاص بها حافلًا، بغض النظر عن السبب. تتطلَّب بعض النظريات المزيدَ من الوقت كي تتطور على النحو المناسب، وربما نتوقع فشلها لو تعرضت للاختبارات قبل الفهم الكامل لمفاهيمها وللقيود المفروضة على تطبيقها. تحتاج النظرية أحيانًا إلى أحد جوانب الدليل المهمة للغاية، والذي قد يستغرق الكشف عنه بعض الوقت. طرح بيتر هيجز الآلية التي سوف يطلق عليها اسمه في ورقة بحثية نُشِرت في عام ١٩٦٤، وقد صارت آلية هيجز مكونًا أساسيًّا في النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات، وهو النموذج الذي يمثِّل الوصف الكمي المقبول حاليًّا لكل الجسيمات الأولية المعروفة. إلا أنه لم يُعترف بصحة النظرية حتى اكتُشِف الدليل، ألا وهو بوزون هيجز[1]، إذ اكتُشِف في مصادم الهدرونات الكبير، بعد خمسين سنة تقريبًا.

الأكيد أن النظرية إذا فشلت في توفير ولو وعد بعبور البحر -إذا حُبِسَت في قوى مد وجزر خاريبدس- فهي نظرية غير قابلة للاختبار.

(١) بوزون هيجز، جسيم أولي يُعتقد أنه المسؤول عن إكساب المادة كتلتها. (المترجم).

لا تهم جدية محاولاتنا، إذ لا نستطيع ببساطة العودة بها إلى الواقع التجريبي. يشير ذلك إلى أن النظرية لا تقوم بأي تنبؤات، أو تقوم بتنبؤات غير محددة، وتحتاج إلى تعديل لا نهائي، هي أقرب إلى كلام العرَّافين أو البضاعة المغشوشة. إنها ميتافيزيقا خالصة، وليست علمًا، وهو ما يصل بي إلى ثاني اقتباساتي المفضلة من أينشتاين: «قادنا امتداد الزمن وشغف الفهم إلى توهم أن الإنسان قادرٌ على فهم العالم الموضوعي بشكلٍ عقلاني عن طريق التفكير المحض، من دون أي أسس تجريبية - أي طريق الميتافيزيقا باختصار»[١].

أريد أن أكون واضحًا تمامًا. لقد ذهبت إلى أنه من المستحيل ممارسة أي علمٍ من أي نوع من دون تضمين الميتافيزيقا بصورة ما. إن التصورات المسبقة الميتافيزيقية ضرورية، وهي مكونات لا يمكن إنكارها داخلة في بناء أي نظرية علمية. إلا أنه يجب أن يكون ثمة اتصالٌ بالدليل التجريبي. يجب أن يكون ثمة شدٌّ وجذبٌ بين الأفكار والحقائق. لا تتعلق المشكلة بالميتافيزيقا تحديدًا بل على الأحرى بطبيعة وحجم المحتوى الميتافيزيقي للنظرية. تظهر المشكلة عندما تكون الميتافيزيقا هي كل ما هناك.

إنه رأيي أنا فقط، بالتأكيد. إذا سَلَّمنا بحاجتنا إلى معيار للتمييز، إذن من المفترض أن نسأل من تقع على عاتقه مسؤولية استخدامه لإصدار أحكام. يذهب الفلاسفة دون روس وجيمس لاديمان وديفيد سبوريت

---

(١) Albert Einstein, 'On the Generalised Theory of Gravitation', Scientific American, April 1950, p. 13.

إلى أن الأفراد (مثلي أو مثلهم) ليسوا في المكان الأفضل الذي يمكّنهم من إصدار مثل هذه الأحكام، وعلينا بدلًا من ذلك الاعتماد على مؤسسات العلم الحديث[١]. تفرض هذه المؤسسات أعرافًا ومعايير، وتوفر آلية لفحص المغزى وتصفية الخطأ، ويجب أن يُسقِط هذا الادعاءات الذاهبة إلى أن المعرفة الموضوعية تُستقى من ميتافيزيقا خالصة. يفعلون هذا ببساطة عن طريق الامتناع عن تمويل الأطروحات البحثية التي لا تُوَفِّي بالمعايير، أو عن طريق الامتناع عن نشر الأوراق البحثية في مجلات علمية معترف بها.

إلا أنني أرى أن حتى المؤسسات غير معصومة من الخطأ، وأن المجتمع العلمي مثله كمثل كل المجتمعات من الممكن أن يقع فريسةً لتفكير القطيع[٢]. تصادف أننا نعيش في عصر يتميز بوفرة حقيقية في التصورات المسبقة الميتافيزيقية متداخلة مع ندرة في الحقائق التجريبية. نمتلئ بالأفكار ونفتقر إلى البيانات. وكما سوف نرى في الفصل العاشر، أعتقد شخصيًّا أن القليل من النظريات قد تجاوزت الحدود التي تضعها معايير التميز، لبعض تلك النظريات مكانة عامة كبيرة، ولستُ وحدي في هذا الاعتقاد. إلا أنه إلى الآن على الأقل، تبدو مؤسسات العلم غير مكترثة.

---

(١) Don Ross, James Ladyman, and David Spurrett, 'In Defence of Scientism', in Ladyman and Ross, Every Thing Must Go, pp. 33–8.

(٢) انظر على سبيل المثال: Lee Smolin, The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next (Penguin Books, London, 2008), and Jim Baggott, Farewell to Reality: How Fairy-tale Physics Betrays the Search for Scientific Truth (Constable, London, 2013).

لذلك أدعوكَ إلى تكوين آرائك الخاصة.

تحقِّق النظرية العلمية المقبولة هدفين على الأقل. إذا كانت النظرية مصاغة في شكل معادلة رياضية واحدة أو أكثر من معادلة، تسمح لنا هذه المعادلات بحساب ما سوف يحدث إذا كانت لدينا مجموعة محددة من الظروف أو المدخلات. نحشر بعض الأعداد، ندير ذراع الآلة، ونحصل على المزيد من الأعداد. قد تمثِّل المخرجات تنبؤات بأرصاد أو بتجارب، يمكننا تصميمها فيما بعد وإجراؤها. أو ربما تفيد في استشراف المستقبل أو تصميم جهاز إلكتروني جديد أو بناء ناطحة سحاب أو وضع مخطط شبكة كهربية للمدينة. ترتكز اهتماماتنا الرئيسية على المدخلات والمخرجات مع استخدامنا للنظرية على هذا النحو، وقد لا نحتاج إلى التفكير كثيرًا للغاية فيما تقوله بالفعل. يمكننا استخدام النظرية في رضا تام بوصفها «صندوقًا أسود»، بوصفها أداة، شريطة أن نثق بدقتها وإحكامها.

أما الهدف الثاني فيتعلق بالكيفية التي تُفَسَّر بها النظرية. يُعبَّر عن المعادلات باستخدام حزمة من المفاهيم التي تمثلها رموز مجردة إلى حدٍّ ما أحيانًا. قد تمثل هذه المفاهيم والرموز خواصَّ وسلوكيات كياناتٍ غير مرئية على شاكلة الإلكترونات والقوى التي تعمل عليها أو التي تُوَلِّدها أو تحملها. على الأرجح، تُبنى المعادلات بحيث يقع كلُّ ما يعنينا داخل مكان ثلاثي الأبعاد، وفي فترة زمنية تمتد من ذلك الوقت إلى الآن أو من الآن حتى وقت ما في المستقبل. يخبرنا تفسير هذه الرموز بعد ذلك بشيء ذي مغزى عن الأشياء التي نجدها في الطبيعة. لم يعد

هذا يتعلّق بقدرتنا على استخدام النظرية، بل يتعلّق بالكيفية التي تغذي بها النظرية فهمنا للعالم.

ربما تظن أنني أعالج هذه النقطة بتفصيلٍ مفرطٍ. أليست كيفية تفسير النظرية الفيزيائية واضحة في النهاية؟ ما الصعوبة الكبيرة في ذلك؟ إذا كنّا مستعدين لقبول وجود الواقعية الموضوعية (فرضية الواقعي #١) وواقعية الكيانات غير المرئية على غرار الفوتونات والإلكترونات (فرضية الواقعي #٢)، فمن المؤكد أن الأمر لا يستدعي قفزة كبيرة للخيال من أجل قبول التالي:

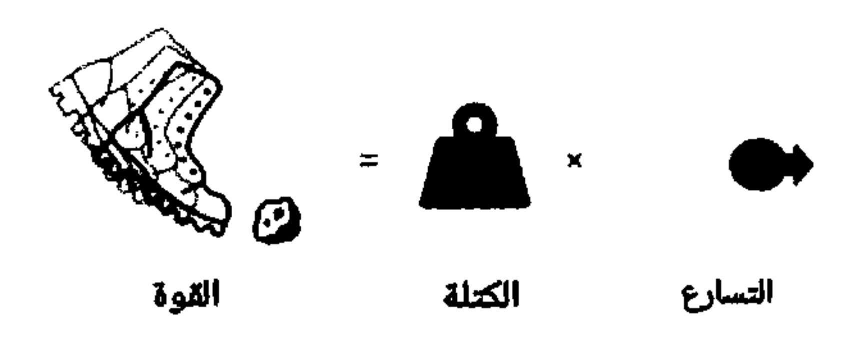
> **فرضية الواقعي #٣:** تمثّل المفاهيم الأساسية التي تظهر في النظريات العلمية خواص الأشياء الفيزيائية الفعلية وسلوكها.

أقصد «بالمفاهيم الأساسية» المصطلحات المألوفة التي نستخدمها لوصف خواص وسلوك الأجسام في نظرياتنا. إنها مفاهيم على شاكلة الكتلة والزخم والطاقة واللف المغزلي والشحنة الكهربية والأحداث التي تكشف عن نفسها في المكان والزمن. من المهم التمييز بين هذه الأشياء وبين المركبات الرياضية الأخرى الأكثر تجريدًا، تلك التي يستخدمها العلماء من أجل معالجة المفاهيم الأساسية كي يقوموا بأنواعٍ معينة من الحسابات. على سبيل المثال، من الممكن في الميكانيكا الكلاسيكية تمثيل الحركات المعقدة لتجمع كبير من الأجسام بشكل أكثر سهولة في صورة حركة نقطة مفردة في شيء يُدعى فضاء التكوين configuration space أو فضاء الطور phase space. لا يطرح أحدٌ أنه من اللازم اعتبار

مثل هذه التجريدات واقعية. يقتصر الأمر على المفاهيم الأساسية التي ترتكز عليها. سوف نرى قريبًا أن الجدل القائم حول تفسير ميكانيكا الكم يتمحور بالأساس حول تفسير الدالة الموجية، هل الدالة الموجية مفهومٌ أساسي، لها خواصٌ واقعية وسلوكيات واقعية؟ أم أنها بنية تجريدية؟

تبدو الفرضية #٣ مباشرة، لكنني أشعر بالتزامٍ نحو توضيح أن الاقتران القائم بين الخبرة اليومية وألفة الميكانيكا الكلاسيكية أعمانا عن التفريق بين العالم الفيزيائي والطرق التي نختار تمثيله من خلالها.

دِعنا نستخدم القانون الثاني لنيوتن كمثالٍ توضيحي، نعرف هذا القانون حاليًا من خلال هذه المعادلة السهلة إلى حدٍّ ما:



يقول إن الحركة المتسارعة تنتج إذا أثرنا بقوة (أو «فعل» من نوع ما) على جسم له كتلة معينة. في إمكاننا اليوم أن نقول إنه من الصحيح تمامًا أن مفهوم القوة الميكانيكية لا يزال ذا شأن في وقتنا الحاضر، أوضحتُ في الفصل الأول أن انتباه فيزيائيي القرنين الثامن عشر والتاسع عشر تحوَّل من القوة إلى الطاقة باعتبارها المفهوم الأكثر جوهرية. تضرب قدمي الحجر، يبذل هذا الفعل قوة على الحجر، إلا أن الطريقة الأفضل للتفكير في الأمر تكمن في إدراك الفعل باعتباره انتقالًا للطاقة إلى الحجر.

طُرِح اصطلاح «الطاقة» للمرة الأولى في أوائل القرن التاسع عشر، وأصبح من الواضح تدريجيًّا أنه كمية محفوظة - لا تفنى الطاقة ولا تستحدث، وهي تتحرك ببساطة حول نظام فيزيائي، تنتقل من جسم إلى آخر أو تتحوَّل من صورة إلى أخرى. اتضح أن طاقة الحركة (الطاقة المرتبطة بالحركة) ليست محفوظة في ذاتها. أدرك الفيزيائيون أن النظام قد يمتلك كذلك طاقة وضعٍ، ترجع إلى خواصه الفيزيائية ووضعه. بمجرد أن فهم الفيزيائيون ذلك أصبح من الممكن صياغة قانون حفظ الطاقة الكلية -طاقة الحركة بالإضافة إلى طاقة الوضع- وقد تحقَّق ذلك بصورة كبيرة من خلال جهود الفيزيائيين المعنيين بمبادئ الديناميكا الحرارية.

صرنا اليوم نستبدل معدل التغير في طاقة الوضع في المكان بقوة نيوتن. فكر في الأمر على هذا النحو. حُكِم على سيزيف -ملك إيفيرا- بأن يدفع صخرة ضخمة نحو قمة تلٍّ إلى الأبد، ذلك لأن الصخرة تتدحرج عائدة إلى السفح (شكل رقم ٨). عندما يدفع الصخرة إلى الأعلى، يستهلك طاقة حركة وهو في سبيله، تتحدد هذه الطاقة وفق كتلة الصخرة والسرعة التي يدحرج بها الصخرة أو يحملها. لو أهملنا أي فقدٍ في الطاقة نتيجة الاحتكاك، فإن طاقة الحركة هذه تتحول كلها إلى طاقة وضع، تحتفظ بها الصخرة الجاثمة عند قمة التل. تتمثل طاقة الوضع هذه في الكيفية التي ينحدر بها التل إلى أسفل. عندما تتدحرج الصخرة على المنحدر نحو الأسفل، تتحول طاقة الوضع إلى طاقة حركة مرة أخرى. وبالنسبة إلى كتلة معروفة، كلما زاد الانحدار (كانت القوة أكبر)، زاد التسارع الناتج.



شكل رقم (٨): أسطورة سيزيف (رسمها تيتيان ١٥٤٩) توضح العلاقة بين طاقة الوضع وطاقة الحركة.

لو وضعنا هذا نصب أعيننا، لماذا قد نتردد -ولو لوهلة- في قبول فرضية الواقعي #٣؟ تعود شخصية سيزيف إلى الميثولوجيا الإغريقية إلا أن ثمة تلالًا عديدة، وصخورًا عديدة، ولا نشك فيما سيحدث عندما

تتدحرج الصخرة نحو الأسفل. لقد اختبرنا التسارع آلاف المرات - ما من شكٍّ في واقعيته.

إلا أن «القوة = الكتلة × التسارع» معادلة في النظرية العلمية الكلاسيكية، وعلينا تذكُّر أنه من المستحيل ممارسة العلم من دون الميتافيزيقا، من دون افتراض بعض الأشياء التي لا يمكننا تدبُّر أدلة عليها. وخشية أن ننسى، تذكر أنه لكي نطبق هذه المعادلة، علينا كذلك ممارسة الفيزياء في صندوق.

علينا التسليم أولًا أن انحدار التل يمثِّل معدل التغير في طاقة الوضع في «المكان». أما التسارع فهو معدل تغير السرعة بالنسبة إلى «الزمن». كما أن السرعة نفسها هي معدل التغير في موضع الصخرة في «المكان» بالنسبة إلى «الزمن». هكذا يتطلب قانون نيوتن الثاني مكانًا وزمنًا، وهو أمر لا يستدعي أي اندهاش فعلي - فهو يتعلق بالحركة في النهاية.

إلا أن مكان وزمن نيوتن المطلقين ميتافيزيقيان تمامًا، كما أوضحت في الفصل الثاني. بصرف النظر عما يبدو في الظاهر، نرى الأشياء تتحرك دائمًا بعضها نحو بعض أو بعيدًا بعضها عن بعض فقط، إذ تغير مواضعها النسبية. إنها حركة نسبية، تحدث في مكان وزمن، معرَّفين مبدئيًّا من خلال العلاقات بين الأشياء نفسها فقط. ذهب منافس نيوتن الرئيسي الفيلسوف جوتفريد فيلهيلم لايبنتز إلى أنه: «من غير الممكن القبول بوهم الكون المادي المتناهي، المتحرك بأكمله في مكانٍ فارغ لا نهائي، إنه غير معقول ومتعذر بالكلية»[1].

---

(١) Gottfried Wilhelm Leibniz, from his correspondence with Samuel Clarke (1715–16), Collected Writings, edited by G. H. R. Parkinson (J. M. Dent & Sons, London, 1973), p. 226.

كان نيوتن واعيًا تمامًا بما يقحم نفسه فيه، لماذا أصرَّ إذن على نظام من مكان وزمن مطلقين؟ لأنه وجد نفسه قادرًا على صياغة بعض قوانين الحركة الناجحة جدًّا عن طريق تبني هذا التصور الميتافيزيقي. يُوَلِّد النجاح درجة من درجات الراحة، ورغبة في تعطيل الشك في الأسس الكبيرة، موضع التساؤل في بعض الأحيان، تلك الأسس التي تنبني عليها التوصيفات النظرية.

ثم هنالك التساؤل المتعلق بتعريف نيوتن للكتلة. وها هو التعريف: «إن كمية المادة هي المقياس نفسه، تأتي من كثافة الجسم وضخامته معًا... أُطلق عليها جسمًا أو كتلة في كل مكان بعدئذٍ»(١). إذا اعتبرنا أن نيوتن يستخدم مصطلح «الضخامة» قاصدًا به الحجم، إذن فإن كتلة جسم هي ببساطة كثافته (فلنقل بالجرامات لكل سنتيمتر مكعب) مضروبة في حجمه (بالسنتيمتر المكعب). لا نستغرق وقتًا كثيرًا حتى نكتشف أن هذا التعريف دائريٌّ تمامًا، كما أوضح ماخ بعد سنوات كثيرة: «بما أننا لا نستطيع تعريف الكثافة إلا باعتبارها كتلة وحدة الحجوم، إذن فالدائرة جلية»(٢).

لا أريد تنبيهك بلا داعٍ، إلا أنه لا يهم إلى أي مدى يبدو مفهوم الكتلة واقعيًّا، فالحقيقة أننا لم نفهمه فعليًّا أبدًا. أفسد أينشتاين كل شيء

---

(١) Isaac Newton, Mathematical Principles of Natural Philosophy, first American edition, translated by Andrew Motte (Daniel Adee, New York, 1845), p. 73.

(٢) Ernst Mach, The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development, 4th edition, translated by Thomas J. McCormack (Open Court Publishing, Chicago, 1919), p. 194.

للغاية بسبب معادلته الشهيرة $E = mc^2$ التي تصبح عميقة المغزى عندما نكتبها على هذه الصورة $m = E/c^2$: إن كتلة الجسم هي مقياس محتواه من الطاقة»[١]. في النموذج القياسي للجسيمات الفيزيائية، يُفترض أن الجسيمات الأولية مثل الإلكترونات «تكتسب كتلة» من خلال تفاعلاتها مع مجال هيجز (هذه هي آلية هيجز). تأتي كتل البروتونات والنيوترونات (وبالتالي كل الذرات في جسدك) في جانبها الأكبر من «طاقة» القوة اللونية (المحمولة بواسطة الجلونات)، تلك القوة التي تربط الكوارك العلوي والكوارك السفلي بداخلها[٢].

هل ترى ما أقصده؟ إذا كانت معادلة بسيطة ومألوفة على غرار القوة = الكتلة × التسارع مفعمة بالمعضلات المفاهيمية وصعوبات التفسير، لماذا نفترض أن بإمكاننا فهم أي شيء على الإطلاق؟

مرة أخرى علينا تذكُّر أننا لا نحتاج فعليًّا إلى فهم الأمر بالكامل كي نستخدمه. نعرف أنه ناجحٌ (ضمن حدود قابليته للتطبيق)، ويمكننا بالتأكيد استخدامه لحساب الكثير من الأشياء المفيدة بالفعل. إلا أن القانون الثاني للحركة أكثر بكثيرٍ من صندوق أسود. ثمة دلالة يقدِّم من خلالها فهمًا أصيلًا، حتى لو كنَّا متشككين في معنى بعض مفاهيمه

---

(١) Albert Einstein, 'Does the Inertia of a Body Depend on its Energy Content?', Annalen der Physik, 18 (1905), 639–41. This paper is translated and reproduced in John Stachel (ed.), Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics, centenary edition (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2005). The quote appears on p. 164.

(٢) انظر كتابي: Mass: The Quest to Understand Matter from Greek Atoms to Quantum Fields (Oxford University Press, Oxford, 2017)

الرئيسية. نعرف بالتأكيد أن نظريتيْ أينشتاين النسبية الخاصة والعامة قد حلَّتا محل قوانين نيوتن، وغيَّرتا الطريقة التي نفكر بها في المكان والزمن والكتلة. إلا أنهما لا تزالان نظريتين كلاسيكيتين (بمعنى أنهما ليستا نظريتيْ كمٍّ). خذها كلمة مني، لا شيء في النسبية قد يهز ثقتنا بفرضية الواقعي #٣. وعلى الرغم من أن المفاهيم الأساسية في نظرياتنا لا تزال على السطح إلى حدٍّ كبيرٍ، فإن علينا قبول ضرورة فهمها أحيانًا على مستوى أعمق نوعًا ما. إن المكان والزمن والكتلة أشياء واقعية لكنَّ فهمنا لها في القانون الثاني للحركة لنيوتن فهمٌ تقريبيٌّ فقط. إن النظريات العلمية كلها في النهاية نظريات مؤقتة، إنها صحيحة بشكلٍ تقريبي أو مشروط فقط، إنها صالحة ما دامت استمرت في توفير توصيفات يُحكم عليها بأنها متفقة مع الدليل.

مع ذلك، إذا كنت قد نجحت في بذر بعض بذور الشك، إذن فقد أديتُ مهمتي. فكما رأينا في الفصل الأول، تعود إلينا هذه الشكوك في ميكانيكا الكم في صورة انتقامٍ قاسٍ مذهل. أرى أن النقاشات حول تفسير ميكانيكا الكم سرعان ما تجعلنا مشوشين وموحولين في موضوع «الواقع». نميل إلى الخلط بين الواقعية الموضوعية (فرضية الواقعي #١)، وواقعية الكيانات «غير المرئية» مثل الإلكترونات (فرضية الواقعي #٢) وواقعية تَمَثُّل خواص وسلوك هذه الكيانات في النظرية العلمية (فرضية الواقعي #٣). سوف أكون أول من يعترف بأن هذه الفرضيات غير قابلة للفصل بصورة كاملة، لكنني سوف أذهب إلى أننا نربح الكثير عندما نعتبر أنها على هذه الصورة.

يبدو أن الفرَضية #٣ مشروطة بقبول #١ و#٢. من المؤكد أنه ما من معنى في أن يدافع الواقعي عن تأويل للتمثل العلمي بينما ينكر في الوقت نفسه أن تلك الأشياء واقعية عندما ننظر إليها أو نفكر فيها، وأن دليلنا الوحيد عليها دليلٌ غير مباشر[١]. مع ذلك من المؤكد أن قبول الفرضيتين #١ و#٢ لا يستلزم قبول الفرضية #٣. يمكننا أن نقبل الفرضيتين #١ و#٢ وأن نختار رفض الفرضية #٣. لقد صرتُ أعتقد أن أفضل طريقة لاستيعاب الجدل حول تفسير ميكانيكا الكم تكمن في النظر إليه لا كجدلٍ حول «طبيعة الواقع» كما هو، بل كجدلٍ حول واقعية تمثلنا للواقع، إنه جدلٌ في الأساس حول الفرضية #٣.

واستهدافًا للكمال، أرغب في توضيح أن ثمة المزيد فيما يتعلق بموضوع الواقعية العلمية[٢]. نحتاج إلى أن نضيف إلى طرحنا أن النظريات العلمية التي تُفسَّر واقعيًا وفق الفرضية #٣ تُوَفِّي بالمعيار التجريبي: يمكن اختبارها والتأكيد على صحتها بشكلٍ تقريبي أو مشروط (في الوقت الحالي) أو يمكن توضيح خطأ تنبؤاتها عن طريق مقارنة التنبؤات بالدليل التجريبي. نحتاج كذلك إلى الموافقة على أننا عندما نتحدث عن «التقدم» في العلم، نفهم أن هذا يتأسَّس على تمثلات

---

(١) علينا الاعتراف بأن بعض المدارس الفلسفية تتأسس على مفهوم يرفض الواقعية الموضوعية (أو يبقى على الأقل محايدًا تجاهها) وذلك سواء اتفقنا مع هذا أم لم نتفق، وفي الوقت ذاته تقبل هذه المدارس بأنه لا يزال من الممكن استنباط تمثلات للظواهر الحسية موثوق بها.

(٢) انظر على سبيل المثال Richard Boyd, 'On the Current Status of Scientific Realism', Erkenntnis 19 (1983), 45–90. Reproduced in Richard Boyd, Philip Gaspar, and J. D. Trout (eds), The Philosophy of Science (MIT Press, Cambridge, MA, 1991), see especially p. 195.

أكثر دقة ونجاحًا، يؤدي الإبحار بسفينة العلم ذهابًا وإيابًا عبر البحر على مر الزمن إلى تحسين وإحكام العلاقة بين التصورات الميتافيزيقية المسبقة والبيانات التجريبية. كتب الفيلسوف هيلاري بوتنام: «إن الحجة التي في صالح الواقعية تتمثَّل في أنها الفلسفة الوحيدة التي لا تجعل من نجاح العلم معجزة»[١]. يشار إليها أحيانًا باسم «حجة غياب المعجزة».

يبدو أنَّ هذا يميز بشكلٍ مباشر نسبيًّا بين الواقعية والتجريبية (أو اللا واقعية) على مستوى التمثل، لكن دعنا لا نعجل كثيرًا للغاية. سعى الفيلسوف جون وورال إلى حل بعض التناقضات القائمة بين الواقعية واللا واقعية، وطور لذلك فلسفة مستقاة من موقف، كان عالم الرياضيات هنري بوانكاريه هو أول من وصفه. يُدعى بالواقعية البنيوية structural realism. بحسب وورال تخبرنا النظريات العلمية عن صورة الواقع أو «بنية الواقع» فقط، لكنها لا تخبرنا شيئًا عن «طبيعة» هذا الواقع من وراء تلك الصورة أو البنية[٢].

عندما تحل نظرية محل نظرية أخرى فإن الرياضيات قد تتغير وحتى تفسيرات المفاهيم الأساسية قد تتغير، إلا أنه يُحتَفظ بالبنية أو بشبكة العلاقات القائمة بين الأشياء الفيزيائية. عمومًا، تتسع النظرية الأفضل لكل العلاقات القائمة بين الظواهر، والتي كانت قد ترسخت من خلال

---

(١) Hilary Putnam, Mathematics, Matter and Method (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1975), p. 73. Quoted in James Ladyman, 'Structural Realism', Stanford Encyclopedia of Philosophy, Winter 2016, p. 6.

(٢) لاحظ أن الواقعية البنيوية ليست تفسيرًا منفصلًا آخر لميكانيكا الكم - نتساءل في هذا الكتاب عمَّا إذا كانت تفسيراتنا لميكانيكا الكم واقعية بنيويًّا.

النظرية التي جرى تبديلها. على سبيل المثال، فإن وصف ميكانيكا الكم للفوتونات يحتفظ بكل العلاقات البنيوية المرتبطة بظاهرتي الحيود والتداخل التي وصفتهما من قبل النظرية الموجية للضوء، رغم الاختلافات الكبيرة جدًّا في الصياغات الرياضية لهذه النظريات.

تأتي الواقعية البنيوية في نكهتين: لدينا النكهة الكانطية التي تطرح أن النظريات العلمية تتعلق بالأشياء كما تبدو في ظاهرها في صورة بنية علاقات تجريبية. مع ذلك ثمة أشياء ميتافيزيقية في نفسها، يفترض وجودها لأن كانط ذهب إلى أنه يستحيل وجود مظاهر من دون شيء يظهر. كان هذا هو الموقف الذي اتخذه بوانكاريه. ولدينا نكهة أخرى أكثر تجريبية (إمبيريقية) تطرح أن العلاقات البنيوية هي كل ما هناك ولا وجود لأشياء في نفسها. قد يدفعنا هذا إلى التساؤل كيف يمكن التأسيس لعلاقات في عدم وجود شيء ترجع له، إلا أن هذا موضع جدلٍ بالفعل إلى حدٍّ كبير، حتى لو كانت الأشياء في نفسها موجودة، لا يزال من المحتمل ألا نقول أي شيء له معنى بخصوصها.

يجعل هذا النوع من المقاربات التمييز بين الواقعي واللا واقعي أقل وضوحًا. توقع الفيلسوف إيان هاكينج هذه الأزمة، وذكَّرنا أن العلم يتعلَّق بما هو أكثر من التَمَثُّل النظري. للعلم هدفان رئيسيان: النظرية والتجربة. يقول هاكينج إن النظرية تُمَثِّل والتجربة تتدخل. نُمَثِّل من أجل أن نتدخل، ونتدخل في ضوء تمثلاتنا. كتب[1]:

---

(1) Ian Hacking, Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1983), p. 31

أشك في وجود حجة نهائية في صالح الواقعية أو ضدها على مستوى التَمَثُّل. عندما نتحول من التمثل إلى التدخل، عندما نتحول نحو رشّ كرات النيوبيوم بالبوزيترونات، تهن قبضة اللا واقعية... إن الحكم النهائي في الفلسفة لما نفعل، لا لكيف نفكر.

تأتي النظريات وتذهب ويرى هاكينج أن التدخل -التجربة- هي الحكم النهائي على الأسئلة المزعجة المتعلقة بالواقع. وسوف نرى فيما يلي أن تقرير ما إذا كان التمثُّل يتطابق مع الفرضية #٣ قد يكون مهمة شائكة. سوف نجد أنه من المفيد في مثل هذه المواقف بلوغ فرضية أبعد، تساعدنا على الوصول إلى استنتاج. ولذلك أقترح إعادة صياغة حجة هاكينج على النحو التالي، مخاطرًا بتشويش التمييز الذي أقامه هاكينج بين التمثل والتدخل:

فرضية الواقعي #٤: توفِّر النظريات العلمية تبصرًا وفهمًا، يُمكِّننا من القيام بأشياء، ربما ما كنَّا لنعتبرها ممكنة أو لنفكر في إمكانيتها من دونها.

أظن أنها فرضية «إيجابية». إذا أخذنا التمثُّل بجدية فقط، نحصل على أساسٍ قوي للعمل من خلاله. قد يتخذ هذا شكل البحث عن بيانات تجريبية جديدة، عن طريق تصميم وبناء وإجراء تجارب جديدة أو القيام بأرصاد جديدة. لا يعني هذا أنه من المستحيل على التمثل اللا واقعي «السلبي» الاشتباك مع التجريبيين وتحفيزهم. لكن هذا يحدث طوال الوقت لأن التجريبيين الذين يهتمون بمثل هذه الأشياء يميلون -كما سوف نرى- إلى تفضيل تمثُّلات الواقعيين ولا يرتاحون في العموم إلى تمثلات اللا واقعيين.

أريد عقد مقارنة بين هذا وبين منظور الفيلسوف اللا واقعي باس ڤان فراسن الذي طور في سبعينات القرن العشرين فلسفة عُرِفت باسم التجريبية الإنشائية constructive empiricism، وهي وريثٌ أقل دوجمائية للوضعية المنطقية. ذهب ڤان فراسن إلى أن النظريات العلمية تحتاج فقط إلى أن تكون «وافية تجريبيًّا». من الكافي أن يتسع التمثل لكل البيانات التجريبية وأن يوفِّر بعض التنبؤات، لكن علينا اجتناب التورط في الكثير للغاية من الميتافيزيقا. إن التمثل هو أداة، وهو سلبي، لا يقدم ما هو أكثر من ذلك.

إذن فهذه الفرضية هي الملاذ الأخير. إذا كانت ثمة حججٌ في الاتجاهين كليهما على مستوى الفرضية #٣، فسوف نبحث عن حكم يتأسس على ما يحفزنا التمثل على القيام به. إذا كان التمثل إيجابيًّا فاعلًا، إذن قد نميل إلى قبول أنه تمثلٌ واقعي، أما إذا كان التمثل سلبيًّا غير فاعل، إذن قد نعتبره لا واقعيًّا.

حسنًا، يكفي هذا في هذا الخصوص[1]. والآن أين نحن؟

---

(١) قد يصيب القراء الإحباط لأنني لم آتِ على ذكر كتاب الفيلسوف توماس كون (بنية الثورات العلمية) ومفهوميه بخصوص العلم الاعتيادي normal science الذي يمارس داخل إطار، والعلم غير المعتاد الذي يغير الإطار أو العلم الثوري. ولكي أكون صادقًا، فإن هذين المفهومين ليسا على صلة تامة بأطروحتي في هذا الكتاب، مع أنهما ليسا أقل إبهارًا من أن يُدرجا فيه. منعتني القيود المتعلقة بالمساحة من مناقشة الموضوع في مساحة أكبر من هذا الهامش، إلا أنني أشجع القراء على الاستضاءة بآراء بعض نقاد كون -خاصة بوبر- في كتاب (النقد ونمو المعرفة) Criticism and the Growth of Knowledge، الذي حرره إمري لاكاتوس Imre Lakatos وألان موسجريف Alan Musgrave، ونشرته مطابع جامعة كامبريدج في عام ١٩٧٠.

الفصل الرابع

عندما نزل أينشتاين إلى الإفطار

لأنكَ لا تستطيع أن تكتب كتابًا عن ميكانيكا الكم من دون فصل عن مناظرة بور وأينشتاين

دِعنا نعود إلى عام ١٩٢٧ متسلحين بهذا المنظور المتعلِّق بعملية التنظير العلمي. استدعت المناظرات التي قامت بين بور وبين كل من شرودنجر وهايزنبرج فترة من التأمُّل العميق. رأينا في الفصل الأول أن شرودنجر دافع عن تفسيرٍ واقعي للدالة الموجية، من منظور الفرضية #٣. إن الدالة الموجية بالنسبة إليه شيء فيزيائي ذو دلالة وملموس، إنها شيء يمكن تصوره، مفهوم أساسي. فضَّل هايزنبرج تفسيرًا لميكانيكا الكم أقرب إلى الوضعيين أو اللا واقعيين. رفض أيَّ طرح من أي نوع عن طبيعة موجية للمادة يمكن تصورها بسهولة، مفضِّلًا التركيز بدلًا من ذلك على ما يمكن رصده، على غرار الخطوط في طيف ذري، واللا اتصالية واللا يقين المتأصلين الجوهريين. أما بور فطاف بين هذين النقيضين، مدركًا صلاح كلا الوصفين، في حيرة من أمره، لا يجد كلامًا يخصُّه.

بعد بعض التمعُّن، استنتج في النهاية أن لغة الفيزياء الكلاسيكية، لغة الموجات والجسيمات، لغة السببية والاتصالية، غير مناسبة إلى حدٍّ

كبير لوصف الظواهر الكمية، إلا أنها اللغة الوحيدة التي نملكها، إذ إننا كائناتٌ ذكية تختبر عالمًا كلاسيكيًّا.

مهما كانت الطبيعة الحقيقية للإلكترون في نفسه أو للسلوك الذي يكشف عنه، هما أمران مشروطان بنوع التجارب التي نختار إجراءها. إنها تجارب تتطلَّب جهازًا له أبعادٌ كلاسيكية، وينتج عنها تأثيرات حقيقية كفاية كي تُرصَد وتُسجَّل في المعمل، ربما في صورة مسارات في غرفة سحابية أو سلسلة من النقاط على لوح فوتوغرافي مُعرَّض للتأثير، تشكِّل نمط تداخل، كما رأينا في شكل رقم ٤.

على ذلك تؤدي تجربة من نوعٍ معين إلى تأثيرات نفسرها باستخدام لغة الفيزياء الكلاسيكية، على غرار حيود الإلكترون والتداخل. نستنتج أن الإلكترون موجة في هذه التجربة. تؤدي تجربة من نوعٍ آخر إلى تأثيرات نفسرها من خلال مسارات واصطدامات الإلكترونات محددة الموضع. نستنتج أن الإلكترون جسيمٌ في هذه التجربة. أرجع بور ذلك إلى أن هذه التجارب متنافية. لا يمكننا تصور تجربة توضح نمطي السلوك كليهما في الوقت نفسه، ليس بسبب افتقارنا إلى الإبداع، بل لأن مثل هذه التجربة لا يمكن تصورها ببساطة.

إن ما نحصل عليه هو عالم كمي يتكوَّن من ظلال، يلقي بها جهازنا الكلاسيكي (فكر في كهف أفلاطون). نستطيع رؤية ظلال موجة الإلكترون أو نستطيع رؤية ظلال الجسيم الخاص به. إلا أننا لا نقدر على رؤية ماهية الإلكترون بالفعل، لأننا غير قادرين على بناء جهاز في هيئة غير تلك الهيئة ذات الأبعاد الكلاسيكية: لا يمكننا اكتشاف أي شيء عن

الإلكترون في نفسه. ليس في مقدورنا سوى التعامل مع ثنائية الموجة - الجسيم الجوهرية، مع عالم كمي ظلاله مختلفة تمامًا عندما نختار إلقاءها وفق طرق مختلفة، مستخدمين أجهزة كلاسيكية مختلفة.

التمس بور حلَّ هذه المعضلة في الإعلان عن أن هذين السلوكين المختلفين المتنافيين ليسا متناقضين، إنهما متكاملان بدلًا من ذلك، إنهما ظلَّان مختلفان للأشياء في نفسها عينها، تلك الأشياء ذات الواقعية الموضوعية.

وعلى ذلك، أين ترك هذا بور من الفرضية #٣؟ هذا سؤالٌ جيد. على الرغم من أن بور كان غامضًا على نحوٍ صارخ في العديد من كتاباته حول الموضوع، وعلى الرغم من أنه كان تجريبيًّا أقل عنادًا بكثيرٍ من هايزنبرج، فإنني أعتقد إجمالًا أنه من العادل استنتاج أن بور قد تبنَّى تفسيرًا لا واقعيًّا في العموم للدالة الموجية. على الرغم من أن إيراد اقتباس واحد من بور لدعم هذا الاستنتاج يُعد نوعًا من التزيد (خاصة أن هذا الاقتباس ليس اقتباسًا مباشرًا)، فإنني لطالما وجدته كاشفًا إلى حدٍّ ما. يقول بور[1]:

«لا وجود لعالم كمي، يوجد وصفٌ فيزيائي كمي تجريدي فقط. من الخطأ الظن أن مهمة الفيزياء اكتشاف كيف هي الطبيعة، تُعنى الفيزياء بما نستطيع أن نقوله عن الطبيعة».

إذا كان قد قالها يومًا، فإن الكثير قد كُتِب عن استخدام بور لعبارة «لا وجود لعالمٍ كمي»، إذ يبدو كأنما ينفي وجود الواقع الموضوعي

---

(1) Niels Bohr, quoted by Aage Petersen, 'The Philosophy of Niels Bohr', Bulletin of the Atomic Scientists, 19 (1963), 12.

(الفرضية #١). أظن أن هذا هراءٌ، وصفة مميزة للجدل الذي يبالغ في تبسيط الأسئلة المتعلقة «بالواقع». أعزو دلالة أكبر لعبارة «تُعنى الفيزياء بما نستطيع أن نقوله عن الطبيعة» إن الاقتباس يدور كله حول «التمثل».

هذا النوع من اللا واقعية دقيقٌ تمامًا. ما يقوله بور بالفعل أن الطبيعة الكلاسيكية لأجهزتنا وقياساتنا ولغة الموجات والجسيمات التي نستخدمها لوصف ما نرى تقيدنا بصورة جوهرية، لذلك فمن العبث كثيرًا تخمين أي شيء بخصوص الواقع أو عناصر «الوصف الفيزيائي الكمي التجريدي»، بما في ذلك الدالة الموجية، إذ إننا لا نملك سبيلًا لاكتشاف أي شيء عنها[1].

عارض هايزنبرج في البداية مفهوم التكامل الخاص ببور، إذ إنه يمنح صحة مكافئة للوصف الموجي المرتبط بمنافسه شرودنجر. وعندما أصبح الجدل بينهما أكثر مرارة وشخصنة. دُعي فولفجانج باولي إلى معهد بور في كوبنهاجن في أوائل يونيو ١٩٢٧ من أجل تهدئة الأمور والتوسُّط في السلام. وبمساعدة باولي وافق بور وهايزنبرج على مصالحة على مضضٍ. كان مفهوم بور عن تكامل الموجة – الجسيم

(١) يطرح تحليل متمعن لآثار وكتابات بور أنه أقرب لمدرسة تُعرف باسم «الذرائعية» pragmatism منه إلى الوضعية positivism. أسَّس الذرائعية تشارلز ساندرز بيرس، وللذرائعية العديد من خواص الوضعية، إذ يرفض الاثنان الميتافيزيقا بشدة. مع ذلك فثمة فروق. يمكننا التفكير في مذهب الوضعي على أنه مذهب «الرؤية هي التصديق»: يتقيد ما يمكننا معرفته بما يمكننا رصده تجريبيًّا. يقبل المذهب الذرائعي (البرجماتي) بمقاربة أكثر عملية (أو في الحقيقة أكثر ذرائعية (برجمانية)): لا يتقيَّد ما يمكننا معرفته بما يمكننا رؤيته بل بما يمكننا فعله. انظر على سبيل المثال: Dugald Murdoch, Niels Bohr's Philosophy of Physics (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987).

ومبدأ اللا يقين واحتمالية بورن الكمية من بين المكونات الرئيسية في تفسير ميكانيكا الكم الذي تمخض عنه النقاش. لا نحتاج إلى أن نقول إنه في حدود ما كان يهم هؤلاء الفيزيائيين كانت ميكانيكا الكم في عام ١٩٢٧ نظرية مكتملة بالفعل، ولا يوجد ما يُضاف إليها.

وتجدر بنا ملاحظة الحماسة التي احتضن بها تلاميذهم هذا المعتقد الكمي الجديد وبَشَّروا به كإنجيل جديدٍ. تحدث هايزنبرج وكتب عن «الروح الكوبنهاجنية» لنظرية الكم[١] Kopenhagener Geist der Quantentheorie. أصبح هذا معروفًا باسم «تفسير كوبنهاجن» مع أنه لم يوجد أبدًا «تفسير» مفرد بالفعل، آمن به كل المدافعين عنه، لو توخينا الدقة. كان مثله كمثل الكتاب المقدس، لكل شخص منظوره الشخصي الخاص عما يعنيه.

لم يحب أينشتاين هذا التفسير على الإطلاق.

كانت الساحة جاهزة لمناظرة كبيرة حول التمثل الكمي للواقع. بدأ الأمر في مؤتمر سولفاي الخامس في بروكسل، وهو مؤتمر ضمن سلسلة مؤتمرات عالمية، تدور حول الفيزياء، الحضور فيها لمن توجَّه إليهم الدعوات فقط، يدعم تلك المحاضرات الثري البلجيكي ورجل الصناعة وأعمال البر إرنست سولفاي. كانت هذه هي المرة الأولى التي تتاح فيها فرصة الاجتماع وجهًا لوجه لأصحاب أدوار البطولة. ألقى بورن وهايزنبرج محاضرة مشتركة، أعلنا فيها أن ميكانيكا الكم نظرية

(١) Werner Heisenberg, The Physical Principles of the Quantum Theory (University of Chicago Press, Chicago, 1930). Republished in 1949 by Dover Publications, New York. This quote appears in the preface.

مكتملة، «لم تعُد افتراضاتها الفيزيائية والرياضية الجوهرية عرضة لأي تغيير»[1]. بعد ذلك ألقى شرودنجر محاضرة عن الميكانيكا الموجية. أعقبتها فترة توقف من أجل منح المشاركين فرصة لحضور مؤتمر يغلب عليه طابع التنافس، أُعدَّ له في باريس، قَدَّم فيه بور محاضرة عن التكامل.

ثم نهض أينشتاين كي يبدي اعتراضه. كان مهتمًّا بتداعيات المجريات الفيزيائية التي قد نفسرها الآن على أنها انهيار للدالة الموجية. عُد وانظر إلى شكل رقم ٥. قبل القياس، تتوزع الدالة الموجية للإلكترون عبر الشاشة، مع احتمالية العثور عليه في أي موضع، حيث لا يساوي مربع الدالة الموجية صفرًا. - شكل رقم ٥ أ. بعد القياس نعرف أن الإلكترون «هنا»، في موضع مفرد - شكل رقم ٥ ب. إلا أن أينشتاين أوضح أننا نعرف في اللحظة نفسها أن الإلكترون ليس «هناك» بالتأكيد، وقد تكون «هناك» أي موضع على الشاشة كنَّا نتوقع العثور على الإلكترون فيه.

ذهب أينشتاين إلى أن هذا «يفترض آلية فريدة تمامًا للتأثير عن بُعد، وهو ما يمنع الموجة الموزعة بشكل متصل في المكان من توليد تأثيرين في موضعين على الشاشة»[2]. سوف يُعرف هذا لاحقًا بشكلٍ واسعٍ

(١) Max Born and Werner Heisenberg, 'Quantum Mechanics', Proceedings of the Fifth Solvay Congress, 1928. English translation from Guido Bacciagaluppi and Antony Valentini, Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2009), p. 437.

(٢) Albert Einstein 'General Discussion', Proceedings of the Fifth Solvay Congress, 1928. English translation from Bacciagaluppi and Valentini, Quantum Theory at the Crossroads, p. 488.

باسم «التأثير الشبحي عن بُعد». يصبح الجسيم الذي كان موزعًا بطريقة ما على مساحة كبيرة من المكان بحسب الدالة الموجية محدد الموضع من فوره، يبدو أن فعل القياس يغيِّر من الحالة الفيزيائية للنظام بعيدًا عن نقطة تسجيل القياس بالفعل. شعر أينشتاين أن هذا النوع من التأثير عن بُعد يخترق أحد الافتراضات الرئيسية لنظريته النسبية الخاصة. من غير الممكن أن ينتقل أي تأثير فيزيائي أو أي معلومة تؤدي إلى تأثير فيزيائي بسرعة تفوق سرعة الضوء. تخترق أي عملية فيزيائية تحدث لحظيًّا على مسافة ملموسة هذا الافتراض.

علينا أن نلاحظ من فورنا أن كل هذه الأحاديث عن التأثير الفيزيائي تفضح حقيقة أن هذه الشواغل تتأسس على تفسير واقعي للدالة الموجية، وفقًا لروح الفرضية #٣. لا يُقصَد من ذلك أن أينشتاين أراد عزو الواقعية للدالة الموجية بالطريقة نفسها التي فعل بها شرودنجر ذلك (سوف نرى بعد وقتٍ قصيرٍ أن منظوريهما كانا منفصلين تمامًا). لكن من المهم إدراك أنه منذ البداية تضمنت مناظرة بور – أينشتاين صدامًا يتعلق بالمواقف الفلسفية. قد نقول إنها مواجهة بين الواقعية واللا واقعية، بين قبول ورفض الفرضية #٣، وذلك في مخاطرة منَّا بالتبسيط المخل.

ما وجدتُه مذهلًا تمامًا أن أينشتاين كان يهاجم موقفًا لم يدافع عنه بور فعليًّا. إلا أننا لو حاولنا استخلاص التداعيات الفيزيائية لافتراضاته الواقعية، فإن أينشتاين كان يبحث عن كشف عدم اتساق ما أصبح سريعًا التفسير المعياري أو التفسير المعتاد.

بالنسبة إلى بور، فإن تفسير كوبنهاجن يدفعنا إلى مقاومة إغراء طرح سؤال: لكن كيف تفعل الطبيعة ذلك بالفعل؟ نصحنا بور أن نمضي في سبيلنا مثلما يفعل أفراد خدمات الطوارئ في موقع الحوادث التراجيدية، إذ لا شيء هنا كي نحاول رؤيته. وهنا تقع العقبة: إذ ما الغرض من نظرية علمية إذا لم تساعدنا على «فهم» العالم الفيزيائي؟ نريد أن ننظر بفضولٍ إلى الواقع. إن السبيل الوحيد إلى ذلك في ميكانيكا الكم عبر أخذ الدالة الموجية على محملٍ أكثر حَرفية وواقعية.

استمر النقاش في قاعة طعام الفندق البريطاني Hôtel Britannique حيث كان يقيم المشاركون في المؤتمر. وصف أوتو شتيرن ما حدث تاليًا[1]:

«نزل أينشتاين إلى الإفطار وعبَّر عن مخاصمته لنظرية الكم الحديثة، كان يبتكر في كل مرة تجربة بديعة جديدة، يرى الواحد من خلالها أن (النظرية) لا تعمل... لم يعره باولي وهايزنبرج -اللذان كانا حاضرين- انتباهًا كبيرًا. (أها حسنًا، سوف يكون كل شيء على ما يرام، سوف يكون كل شيء على ما يرام.) ach was, das stimmt schon, das stimmt schon. على الجانب الآخر تأمَّل فيها بور في عناية، وفي المساء في وقت العشاء، كنَّا جميعًا معًا، وأوضح الأمر في تفصيلٍ».

(١) Otto Stern, interview with Res Jost, 2 December 1961. Quoted in Abraham Pais, Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford University Press, Oxford, 1982), p. 445.

طوَّر أينشتاين سلسلة من الاختبارات الافتراضية، أو gedankenexperiment (التجارب الذهنية)، القائمة على الاعتقاد في الفرضية #٣. هذه التجارب عن الأمور من حيث المبدأ. ليس المقصود بها أن تؤخذ بحَرفية للغاية مثل التجارب العملية التي من الممكن تنفيذها في المعمل.

بدأ بمحاولة إظهار عدم الاتساق في تفسير مبدأ اللا يقين، إلا أن بور دحض كلَّ تحدٍّ في براعة. مع ذلك وتحت ضغط إصرار أينشتاين على سبر الأغوار، قام بور بتغيير دقيق في أسس حججه المضادة. اضطُر بور إلى التراجع نحو مفهوم يذهب إلى أن القياسات التي تستخدم أجهزة كلاسيكية تكون «غير بارعة» أبدًا، وهو ما يفرض قيودًا على ما يمكن قياسه، بدلًا من أن تكون القيود مفروضة على ما يمكننا معرفته. كان هذا بالضبط هو الموقف الذي انتقد بسببه هايزنبرج مطلع ذلك العام.

رأى أغلب الفيزيائيين الذي كانوا مجتمعين في بروكسل أن بور ربح جولة ذلك اليوم، إلا أن أينشتاين ظلَّ غير مقتنعٍ في عنادٍ، وبُذِرت بذور تحدٍّ أكبر بكثيرٍ.

كتب بور في سنة لاحقة: «في اجتماعي التالي مع أينشتاين في مؤتمر سولفاي في عام ١٩٣٠، اتخذتْ نقاشاتنا منحنى دراميًّا تمامًا»[١].

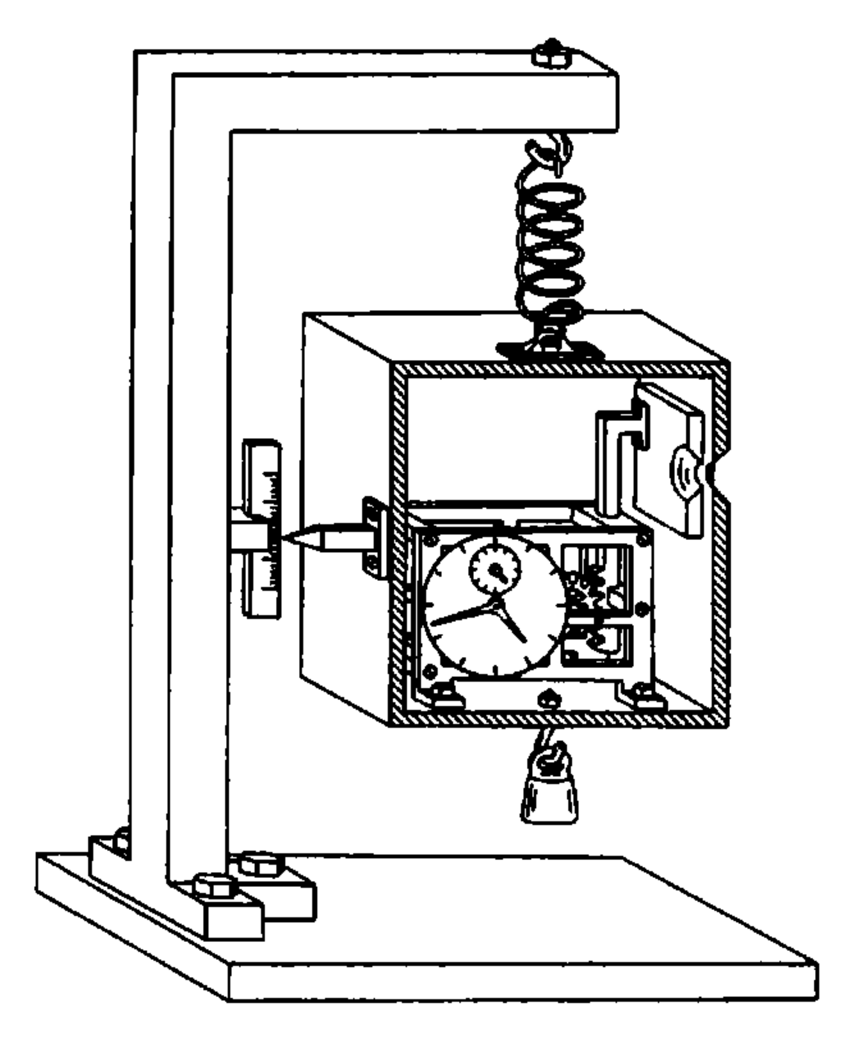
---

(١) Niels Bohr, in Paul Arthur Schilpp (ed.), 'Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics', in Albert Einstein. Philosopher-scientist, The Library of Living Philosophers, Volume 1 (Harper & Row, New York, 1959; first published 1949), p. 224.

قال أينشتاين، افرض أننا بنينا جهازًا يتكوَّن من صندوق يحتوي على ساعة تتصل بغطاء. يغطي الغطاء فتحة صغيرة في الجانب. نملأ الصندوق بفوتونات ونزِنه. وفي وقت محدد مسبقًا ومعروف بدقة، نستحث الغطاء كي يفتح لفترة زمنية قصيرة، كافية للسماح لفوتون مفرد بالهروب. يغلق الغطاء، نعيد وزن الصندوق، ونحدد بدقة كبيرة طاقة الفوتون الذي هربَ من فارق الكتلة ومن $E = mc^2$. وبهذه الطريقة قِسنا كلًّا من طاقة الفوتون والفترة الزمنية التي خرج خلالها من الصندوق، وقد فعلنا ذلك بدقة تتعارض مع علاقة اللا يقين للطاقة والزمن، هذه هي تجربة أينشتاين «صندوق الفوتون».

صُدم بور تمامًا، ولم يرَ الحل من فوره. لم ينم ليلته، باحثًا عن خلل في حجة أينشتاين، إذ كان مقتنعًا بوجود خللٍ بالتأكيد؛ صارت لديه إجابة بحلول الإفطار في صباح اليوم التالي.

رسم بور على سبورة صورة غير متقنة وغير واقعية للجهاز الذي نحتاج إليه كي نقوم بالقياسات على النحو الذي وصفه أينشتاين (شكل رقم ٩). في هذا الرسم، يُصوَّر الصندوق معلَّقًا بواسطة زنبرك، ومزودًا بمؤشر بحيث تُمكن قراءة موضعه على عدادٍ مثبتٍ إلى الدعامة. يضاف وزن صغير من أجل أن يحاذي المؤشر الصفر على العداد. آلة الساعة موضحة بداخل الصندوق، ومتصلة بالغطاء.



شكل رقم (٩) تجربة أينشتاين الذهنية gedankenexperiment «صندوق الفوتون»

بعد خروج فوتون واحد، يُستبدل الثقل الصغير بواحدٍ آخر، أثقل قليلًا. يؤدي هذا إلى معادلة الوزن المفقود بسبب خروج الفوتون، وهكذا

يعود المؤشر إلى الصفر على العداد. نفترض أن الوزن اللازم للقيام بهذا يمكن أن يتحدد بشكلٍ مستقلٍ بدقة غير متناهية. يعطي الفارق بين الوزنين -ذلك الفارق الذي نحتاج إليه لمعادلة الصندوق- كتلة الفوتون الذي سُمِح له بالخروج، وبالتالي يعطينا طاقته، وذلك حسبما ادَّعى أينشتاين.

إلى الآن كل شيء على ما يرام.

لفت بور الأنظار إلى عملية الوزن الأولى، قبل هروب الفوتون. من الواضح أن الساعة معدَّة لتستحث الغطاء في وقت سابق التحديد والصندوق مغلق. لا يمكننا النظر إلى الساعة لأن ذلك يتضمن تغييرًا في الفوتونات، وبالتالي في الطاقة بين الصندوق والعالم الخارجي.

من أجل أن نزِن الصندوق، يجب أن نختار وزنًا يعيد المؤشر إلى الصفر على العداد. إلا أنه من أجل القيام بقياسٍ دقيقٍ للموضع، نحتاج إلى إنارة المؤشر والعداد - نحتاج إلى الرؤية. لكن من اللازم أن يكون هذا الجهاز حسَّاسًا بشدة - إذ إن موضع الصندوق يجب أن يتغير عند خروج فوتون مفرد. لذلك، عندما ترتطم الفوتونات بالعداد، من المتوقع أن يقفز الصندوق بشكلٍ غير متوقع. يمكننا زيادة دقة قياس موضع المؤشر «المتوسط» عن طريق السماح لأنفسنا بوقتٍ طويلٍ، من أجل القيام بعملية الموازنة خلاله. سوف يمنحنا هذا الدقة اللازمة في وزن الصندوق، وبما أننا نستطيع توقُّع الحاجة إلى هذا، فإنه من الممكن إعداد الساعة بحيث لا تفتح الغطاء إلا بعد إتمام عملية الموازنة هذه.

والآن تأتي ضربة بور القاضية coup de grâce.

بحسب نظرية أينشتاين النسبية العامة، تتعرَّض الساعة التي تتحرك في مجال للجاذبية لتأثيرات تمدُّد الزمن. تُغيِّر عملية وزن الساعة من الطريقة التي تُعلِن بها الوقت. عندما يقفز الصندوق إلى الأعلى يبطئ الزمن. عندما يقفز إلى الأسفل يُسرِع الزمن. ونظرًا إلى أن الصندوق يقفز بصورة غير متوقعة في مجال للجاذبية (نتيجة عملية موازنة وزن الصندوق عند قياس موضع المؤشر) يتغيَّر معدل الساعة على النحو غير المتوقع نفسه. يؤدي هذا إلى لا يقينٍ بخصوص توقيت فتح الغطاء والذي يعتمد على طول الفترة الزمنية اللازمة لإتمام عملية معادلة الوزن. كلما طالت مدة هذه العملية (زادت الدقة القصوى لقياس طاقة الفوتون)، وزاد اللا يقين بخصوص لحظة خروجه بالضبط.

كان بور قادرًا على توضيح أن حاصل اللا يقين في الطاقة والزمن في جهاز صندوق الفوتون متسق تمامًا مع مبدأ اللا يقين.

على الرغم من أن تجربة صندوق الفوتون استمرت في تفريخ عدد من الأوراق البحثية التي تذهب إلى صحة حجة بور المضادة أو تعارض صحتها، أقرَّ أينشتاين بأن استجابة بور بدت «خالية من التناقضات»، فإنها لا تزال -من منظوره- تحتوي على «لا معقولية ما»[١]. في ذلك الوقت، رحبوا بهذا بوصفه انتصارًا لبور ولتفسير كوبنهاجن. استخدم بور نظرية أينشتاين النسبية العامة ضده.

---

(١) Albert Einstein, quoted by Hendrik Casimir in a letter to Abraham Pais, 31 December 1977. Quoted in Pais, Subtle is the Lord, p. 449

إلا أنه عليك ملاحظة أن بور كان مجبرًا مرة أخرى على الدفاع عن سلامة مبدأ اللا يقين باستخدام حجج تتأسس على اضطراب النظام الكمي المرصود، وهو اضطرابٌ حتميٌّ وكبيرٌ. للوهلة الأولى يبدو أنه ما من طريقة للالتفاف حول ذلك وتجنبه. بالتأكيد دائمًا ما يتضمن قياسٌ من أي نوعٍ تفاعلاتٍ لها على الأقل حجم النظام الكمي المُقاس نفسه. كيف يمكن اجتناب الاضطراب الطائش المحتمل؟

اختار أينشتاين تحويل بؤرة اعتراضه، بدلًا من الذهاب إلى أن ميكانيكا الكم غير متسقة، وخاصة مذهب اللا يقين، سعى إلى استنباط مغالطة منطقية تنبع مما رأى أنه عدم اكتمال النظرية. وعلى الرغم من مرور خمس سنوات أخرى، فإن بور لم يكن على أهبة الاستعداد لتحرك أينشتاين التالي.

وعلى الرغم من الاستحالة البادية، فإن أينشتاين احتاج إلى العثور على سبيلٍ لجعل دفاع بور المبني على الاضطراب إما غير ذي صلة وإما غير مقبول. يعني هذا ابتكار وضع فيزيائي، من الممكن فيه من حيث المبدأ اكتساب معرفة بالحالة الفيزيائية لنظام كمي من دون بث الاضطراب فيه بأي طريقة. عمل أينشتاين مع اثنين من المُنَظّرين صغار السن بوريس بودولسكي وناثان روزين وذلك من أجل ابتكار تحدٍّ جديد، ماكر بدرجة غير معقولة، لقد وجدوا سبيلًا إلى القيام بما يبدو مستحيلًا.

تخيل وضعًا يتفاعل فيه جسيمان كميان ويتحركان أحدهما مبتعد عن الآخر. قد يكون هذان الجسيمان -على سبيل المثال- فوتونين انبعثا من ذرة في تتابعٍ سريعٍ، أو قد يكونان إلكترونين أو ذرَّتين. وللتسهيل،

نشير إلى هذين الجسيمين باعتبارهما A وB. ومن أجل هدفنا، نحتاج فقط إلى افتراض أن الجسيمين قد تولَّدا في حالتين فيزيائيتين متقابلتين، نتيجة عمل قانون ما من قوانين الحفظ. لا تهم فعليًّا ماهية هاتين الحالتين، لذلك دِعنا نطلق عليهما «علوية» ونشير إليها بالرمز ↑ و«سفلية» ونشير إليها بالرمز ↓. هكذا، نتخيل عملية فيزيائية تُوَلِّد زوجين من الجسيمات الكمية – A وB في حالتين ↑ و ↓ بحيث إذا كان A ↑ يجب أن يكون B ↓، وإذا كان A ↓ يجب أن يكون B ↑.

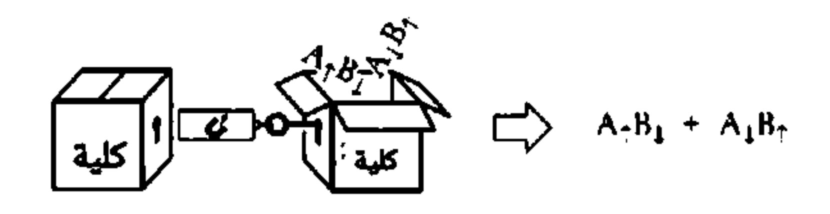
إليكَ الأمر، بحسب ميكانيكا الكم، تستخدم الطريقة الصحيحة لوصف هذا النوع من الأوضاع دالة موجية مفردة، تشمل كلا الجسيمين وكلا النتيجتين المحتملتين. يقال إن مثل هذين الجسيمين متشابكان.

نتبع القواعد الرياضية وندوِّن صياغة لهذه «الدالة الموجية الكلية» والتي نصيغها باعتبارها تراكبًا كميًّا لمساهمتي الدالتين الموجيتين لكلا الوضعين المحتملين. وعند قيامنا بهذا، نُجبر على تضمين إسهامين فيهما A ↑ و↓، و B ↑ و↓. إلا أن قانون الحفظ يستبعد بصورة واضحة احتمالية رصد زوجين فيهما A وB كلاهما ↑ أو كلاهما ↓.

هكذا لا يتبقَّى لنا إلا شيء يشبه هذا:

كلية = $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ + $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$

دِعنا الآن نفترض أن الجسيمين A وB انفصلا وتحركا مبتعدين أحدهما عن الآخر لمسافة. نقوم بقياس على أي من الجسيمين من أجل اكتشاف حالته. ولأن هذا قياس يُجرى على الدالة الموجية الكلية لجسيمين، إذن نحن مجبرون على تمثيل هذا من خلال قيمة التوقُّع لمؤثر القياس العامل على الدالة الموجية الكلية:



قيمة التوقع لمؤثر القياس　　　　ناتجا القياس متساويا الاحتمالية

ونرى أن الناتجين $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ و $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$ محتملان بالقدر نفسه. إلا أننا بالتأكيد سوف نرى ناتجًا واحدًا فقط دائمًا عند كل قياسٍ، وهو ما يشبه رصد نقطة مفردة عند مرور كل إلكترون عبر الشقين، بحيث يمر إلكترون واحد في كل مرة. لذلك عندما نفسر هذا تفسيرًا واقعيًّا، علينا افتراض أن الدالة الموجية الكلية تنهار كي تُوَلِّد ناتجًا واحدًا فقط، إما $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ وإما $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$، بحيث إذا قمنا بسلسلة من القياسات المنكررة على أنظمة مجهزة بشكلٍ مثالي، نحصل على $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ في ٥٠٪ من المرات وعلى $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$ في ٥٠٪ من المرات.

والآن افرض أننا قمنا بقياسٍ على A من أجل اكتشاف أنه↑. يعني ذلك بالتأكيد أن الدالة الموجية الكلية قد انهارت مُخَلِّفة B في حالة ↓. وعلى

المنوال نفسه إذا اكتشفنا أن A ↓، يعني ذلك بالتأكيد أن الدالة الموجية الكلية قد انهارت مُخَلِّفة B في حالة ↑. لا وجود لنتائج أخرى محتملة.

ترتبط الدالة الموجية الكلية باحتمالية الحصول على ناتجٍ واحدٍ أو الآخر فقط، وهكذا ليس لدينا -من حيث المبدأ- أي سبيلٍ إلى أن نعرف بشكلٍ مسبق إذا كان A سوف يُقاس ويكون ↑ أو ↓. إلا أن هذا لا يهم فعليًا، إذ إننا بمجرد أن نعرف حالة A نعرف كذلك حالة B بصورة مؤكدة، حتى لو لم نقِسه. بمعنى آخر، يمكننا اكتشاف حالة الجسيم B بشكلٍ مؤكدٍ من دون بث الاضطراب فيه بأي شكلٍ. إن كلَّ ما علينا افتراضه هو أن أي قياس نقوم به على جسيم A لا يؤثِّر بأي شكل في B أو يبث فيه الاضطراب، وهذا الجسيم B قد يكون بعيدًا عن A بأي مسافة، فلنقُل نصف المسافة عبر الكون، نستنتج من ذلك أن حالة الجسيم B (وبالتالي حالة الجسيم A عن طريق الاستدلال) كانت محددة بالتأكيد طوال الوقت.

شيطاني، أليس كذلك؟

قدَّم أينشتاين وبودولسكي وروزين تعريفًا للواقع الفيزيائي ذا حمولة فلسفية، وذلك في ورقتهم البحثية المنشورة عام ١٩٣٥ التي جاء عنوانها «هل يمكن للوصف الميكانيكي الكمي للواقع الفيزيائي أن يعتبر كاملًا؟»[١]:

---

(١) Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen, 'Can QuantumMechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?', Physical Review, 47 (1935), 777–80. This paper is reproduced in John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983), pp. 138–41. This quote appears on p. 138.

إذا كان في إمكاننا توقُّع قيمة كِمية فيزيائية بشكلٍ مؤكد (أي باحتمالية تساوي الواحد) وذلك من دون بث الاضطراب في النظام، إذن يوجد عنصرٌ من واقعية فيزيائية مقابل لهذه الكِمية الفيزيائية.

من السهل رؤية ما كانوا يحاولون القيام به. إذا فسَّرنا الدالة الموجبة بصورة واقعية، وفق الفرضية #٣، إذن يمكنها تعليل واقعية الخواص -واقعية حالتي الجسيمين A وB- التي تدَّعي وصفهما. ومن الواضح أنها لا تفعل. لا وجود لشيء يصف هاتين الحالتين قبل القيام بالقياس على A، وبذلك يستحيل أن تكون النظرية مكتملة.

يتمثل البديل في قبول أن واقع حالة الجسيم B تحدِّدها طبيعة القياس الذي نختار القيام به على جسيم مختلفٍ تمامًا، يبعد بأي مسافة عن الجسيم الآخر. بغض النظر عمَّا قد نعتقده بخصوص ما يجري، يبدو أن الأمر يستلزم «تأثيرًا شبحيًّا عن بُعد»، وهو ما يتعارض مع نظرية النسبية الخاصة. ذهب أينشتاين وبودولسكي وروزين إلى أنه: «ما من توصيفٍ معقولٍ للواقع قد نتوقع سماحه بهذا»[١].

ظهر تقريرٌ عن تفاصيل هذا التحدي الأخير في النيويورك تايمز قبل نشر ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية، وذلك في مقالٍ خبري بعنوان «أينشتاين يهاجم نظرية الكم» قدَّم المقال ملخصًا غير متخصص للحجج الرئيسية، مصحوبًا باقتباسات كثيرة من بودولسكي، الذي بدا أنه المؤلف الرئيسي للورقة البحثية.

---

(١) Einstein, Podolsky, and Rosen, 'Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?' Also Wheeler and Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement, p. 141.

بدا أن أينشتاين قد ندم لاحقًا على الكثير بخصوص لغة وطبيعة الحجج الموظفة في ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين، خاصة معيار الواقعية. ربما كان أكثر ما أثار إحباطه أن التحدي الأساسي الذي تطرحه ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين لا يتطلب هذا المعيار (أو أي معيار)، وإن كان يتأسس على افتراض أنه مهما كان ما نظنه عن الواقع، فمن المفترض أنه محليٌّ local، ما يعني أنه ما دام تحرك الجسيمان A وB مبتعدين أحدهما عن الآخر، فمن المفترض أن وجودهما مستقلٌّ أحدهما عن الآخر. أسِف أينشتاين لمقال النيويورك تايمز والشهرة التي أحاطت به.

مع ذلك، فقد أصاب هذا التحدي الجديد من قِبَل أينشتاين مجتمع فيزيائيي الكم الصغير بصدمة عنيفة. ضرب بور «كصاعقة من السماء»[١]. كان باولي حانقًا، وتعجَّب بول ديراك: «والآن علينا أن نبدأ كل شيء من جديد، لأن أينشتاين أثبت أن هذا لا يفلح»[٢].

جاء رد فعل بور بعد وقتٍ قصيرٍ، استهدف معيار الواقعية لا محالة، واعتبره نقطة الضعف الرئيسية. ذهب إلى أن الجملة الشرطية «من دون

---

(١) Léon Rosenfeld, in Stefan Rozenthal (ed.), Niels Bohr: His Life and Work as Seen by his Friends and Colleagues (North-Holland, Amsterdam, 1967), pp. 114–36. Extract reproduced in Wheeler and Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement, pp. 137 and 142–3. This quote appears on p. 142.

(٢) Paul Dirac, interview with Niels Bohr, 17 November 1962, Archive for the History of Quantum Physics. Quoted in Mara Beller, Quantum Dialogue (University of Chicago Press, Chicago, 1999), p. 145.

بث الاضطراب في النظام بأي طريقة» جملة ملتبسة بالضرورة، لأن النظام الكمي يتأثَّر بالظروف التي تحدد سلوكه المستقبلي. بمعنى آخر، علينا التعامل مع عناصر الواقعية التجريبية المُحدَّدة من خلال النظام الكمي في سياق القياسات التي نقوم بها عليه، والجهاز الذي نستخدمه، لا من خلال النظام الكمي بشكل مجرد. بملي هذا ما يمكننا توقع رصده. يقع خطأ ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين في افتراضهم أن الدالة الموجية يجب تفسيرها بشكل واقعي، و«التأثير الشبحي عن بعد» هو ببساطة أحد تداعيات هذا الخطأ. عليك فقط ألا تسأل كيف تقوم الطبيعة بهذا بالفعل، إذ إنه ما من شيء هنا فعليًّا كي تراه.

نجح أينشتاين على الأقل في دفع بور إلى التخلي عن دفاعه الأخرق، وتبني موقفًا لا واقعيًّا أكثر حزمًا. بدا أن أولئك الذين يأبهون لهذه الأشياء في مجتمع الفيزياء أقرُّوا بأن رد فعل بور قد وضع الأمور في نصابها.

كتب شرودنجر تهنئة إلى أينشتاين بعد وقتٍ قصيرٍ من ظهور ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية مطبوعة. أبرز في خطابه ماهية التحدي الرئيسي في الحقيقة. عند تفسير الأمر بشكلٍ واقعيٍّ، فإن الدالة الموجية الكلية للجسيمين «لا محلية» بالضرورة، إنها موزَّعة بالطريقة نفسها التي تتوزع بها الدالة الموجية للإلكترون عبر الشاشة في تجربة الشق المزدوج. يذهب حدسنا إلى تخيل أن الجسيمين A وB ينفصلان بعد أن يتحرَّكا مسافة طويلة كفاية ويبتعد أحدهما عن الآخر. إنهما جسيمان متمايزان أو موجودان بشكلٍ مستقلٍّ أحدهما عن الآخر أو «واقعيان محليًّا» locally real. لا تملك ميكانيكا الكم على الإطلاق أيَّ تفسير للكيفية التي نتحوَّل فيها من وضعٍ إلى الآخر.

ردَّ أينشتاين في حماسٍ، ومع تواصل المراسلات فيما بينهما خلال صيف عام ١٩٣٥ بدأ يبزغ تدريجيًّا تحدٍّ أعمق لِمَا أصبح يُعرف حاليًّا بتفسير كوبنهاجن التقليدي.

في البداية كان على أينشتاين أن يتعامل مع إصرار شرودنجر على أن الدالة الموجية تُفسَّر باعتبارها وصفًا «لموجة مادية» فعلية. وعلى الرغم من أنه لم يستطع توضيح التفاصيل، فإن أينشتاين فضَّل التفكير في الدالة الموجية من جهة الإحصاء. نصف خواص غاز ذري من خلال كميات فيزيائية على غرار درجة الحرارة والضغط. إلا أننا عندما نتدبَّر في أمر الغاز باعتباره مجموعة من الذرات، يمكننا استخدام النظريات الكلاسيكية التي طوَّرها لودفيج بولتزمان وجيمس كلارك ماكسويل من أجل استنباط درجة الحرارة والضغط عن طريق حساب المتوسط الإحصائي للحركات الذرية. في هذه الحالة، نتعامل مع الإحصاء والاحتمالات فقط، لأننا لا نملك سبيلًا إلى تتبُّع حركات كل ذرة مفردة في الغاز. قد لا نستطيع بالطبع توضيح مثل هذه الحركات إلا من خلال الإحصاء، لكن هذا لا يعني أن الذرات (أو حركاتها) ليست واقعية.

كان تفسير أينشتاين الواقعي للدالة الموجية مختلفًا جدًّا عن تفسير شرودنجر. إذا كانت الاحتمالية الكمية في النهاية احتمالية إحصائية وليدة الجهل، إذن يجب أن يوجد واقع أعمق من خلفها، نجهله، مثلما نجد الحركات الذرية من وراء درجة حرارة الغاز وضغطه. كانت هذه هي وجهة نظر أينشتاين: وبما أن الواقع الأعمق لا يكشف عن نفسه في ميكانيكا الكم، إذن لا يمكن اعتبار النظرية نظرية مكتملة. لا يقترب

أينشتاين من تحديد ما الذي يظنُّه بخصوص هذا الواقع الأعمق، وتصل ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية إلى تعليق نصُّه: «لقد تركنا السؤال مفتوحًا عمَّا إذا كان مثل هذا التوصيف موجودًا أم غير موجود، مع ذلك، نعتقد في أنها نظرية ممكنة»[١]. لديَّ المزيد لأقوله عن هذا في فصلٍ لاحقٍ.

يستحيل أن يكون تفسير شرودنجر للدالة الموجية صحيحًا، سعى أينشتاين إلى إقناعه بهذا في خطابٍ يعود تاريخه إلى ٨ أغسطس ١٩٣٥. طلب منه أينشتاين في هذا الخطاب أن يتخيَّل شحنة من البارود، قد تنفجر تلقائيًا في أي وقتٍ خلال عام. يوصَف البارود بواسطة دالة موجية في بداية العام، لكن كيف نصف الوضع على مدار العام؟ نعتبر الدالة الموجية تراكبًا كميًّا للدالتين الموجيتين المقابلتين لحدوث الانفجار ولعدم حدوث الانفجار، وذلك إلى أن ننظر كي نرى ما حدث. كتب[٢]:

«يستحيل على أي تفسير مهما كان مبدعًا أن يحول هذه (الدالة الموجية) إلى توصيف مناسب للوضع الراهن الفعلي، إذ إنه لا يوجد في الواقع ما هو بين المنفجر وغير المنفجر».

---

(١) Einstein, Podolsky, and Rosen, 'Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?'. Also in Wheeler and Zurek, (eds), Quantum Theory and Measurement, p. 141.

(٢) Albert Einstein, letter to Erwin Schrödinger, 8 August 1935. Quoted in Arthur Fine, The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory, 2nd edition (University of Chicago Press, Chicago, 1996), p. 78.

رضخ شرودنجر، وانتهى إلى مشاركة أينشتاين وجهات نظره، إلا أن تجربة البارود جعلته يفكر. بما أنه لا وجود لما يفسِّر انهيار الدالة الموجية في الصياغة الرياضية لميكانيكا الكم، إذن لماذا نفترض حدوث هذا على المستوى الكمي؟ لماذا لا نتخيل أن التشابك الكمي يمتد على طول سلسلة القياس، إلى الجهاز الكلاسيكي نفسه؟ أطَّر شرودنجر لتجربة ذهنية أخرى في ردٍّ يعود تاريخه إلى ١٩ أغسطس، وهي التجربة الذهنية التي أصبحت خالدة الذكر[١]:

«يحتوي صندوق معدني على عداد جايجر، معه كمية ضئيلة من اليورانيوم، وهي كمية صغيرة جدًّا بحيث إنه خلال الساعة القادمة، ثمة احتمالية لحدوث انحلالٍ ذري واحد، وهي احتمالية مكافئة لعدم حدوث هذا الانحلال. تعمل وحدة تضخيم موجودة على ضمان كسر زجاجة تحتوي على الحمض البروسي (سم السيانيد) مع حدوث أول انحلال ذري. ثمة قطة محبوسة كذلك -في قسوة- داخل الصندوق المعدني. وبحسب (الدالة الموجية) للنظام الكلي -أستميحك عذرًا بخصوص العبارة sit venia verbo- توحَّل القطة الحية والميتة في قياس متكافئ».

هذه هي مفارقة قطة شرودنجر الشهيرة.

اتفق أينشتاين مع ذلك تمامًا. إن دالة موجية كلية تتكوَّن من مساهمة دالتين موجيتين لقطة حية وميتة هي بالتأكيد أمرٌ خيالي. من الأفضل تفسير الدالة الموجية بصورة واقعية من خلال الإحصاء. إذا استُنسخت

(١) Erwin Schrödinger, letter to Albert Einstein, 19 August 1935. Quoted ibid., pp. 82–3.

التجربة، ومُلئ المعمل بمئات الصناديق، يحتوي كلٌّ منها على قطة، نتوقع أنه بعد ساعة سوف تكون القطط ميتة في عددٍ محدد من هذه الصناديق (عدد نتوقعه كاحتمالية نحصل عليها من الدالة الموجية)[1].

يطقطق الصندوق أم لا يطقطق. إذا طقطق، تُفعَّل وحدة التضخيم، يُطلق الحمض البروسي وتُقتل القطة. إذا لم يطقطق، تنجو القطة. لا تبدو القطة معلقة في مطهر[2] من نوع خاص في أي مكان في التجربة.

قصد شرودنجر من مفارقة القطة أن تكون لمزًا على سبيل الهزل، يسخر به من عدم اكتمال ميكانيكا الكم، لا أن تكون تحديًا مباشرًا لتفسير كوبنهاجن. لم يبدُ أن المفارقة استثارت بور من أي وجه كي تدفعه إلى استجابة رسمية. كتب شرودنجر إلى بور في ١٣ أكتوبر ١٩٣٥ كي يخبره أنه وجد ردَّه على التحدي الذي جاءت به ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين غير كافٍ نوعًا ما. بالتأكيد ذهب إلى أن بور تجاهل احتمالية أن التطورات العلمية في المستقبل قد تقوض الجزم بأن جهاز القياس يجب أن يُعامل دائمًا وفق الفيزياء الكلاسيكية. ردَّ بور باختصارٍ، إذا كانوا سيقدمون أجهزة قياس، فمن المستحيل ببساطة أن يكون لها أبعاد كمية.

كان على المجتمع العلمي في ذلك الوقت المضي قدمًا بأي حالٍ، وعلى الأرجح لم تكن شهيَّته مفتوحة لجدلٍ فلسفي بلا نهاية، ومن منظور الغالبية فقد أوضح بور الأمر بالفعل.

---

(١) ومن المرجح أن يعقب هذا الحدث زيارة من هيئات الرفق بالحيوان.

(٢) يعتقد الكاثوليك أن أرواح المؤمنين الخطاة تذهب إلى المطهّر، حيث تتلقّى العذاب وتتطهّر من الخطايا حتى تليق بالفردوس. (المترجم).

في الوقت نفسه، أصبحت «روح كوبنهاجن» Copenhagen Geist مصاغة ومكرسة في البنية الرياضية العميقة لميكانيكا الكم. بزغت النظرية من تداعيات فوضوية للغاية لاكتشافات تضمنت بطشًا ضمنيًّا بالرياضيات، أكثر من أن تكون جاءت من رحم افتراضات قليلة غير مبررة وقفزات إيمانية مفاهيمية حدثت بمحض الصدفة. في سنواتها الأولى، كان المرور عبر بحر التمثُّل صعبًا. ثم كان التحدي المتعلِّق بالتوفيق بين المقاربتين المختلفتين للغاية لميكانيكا الكم، وهما المقاربتان اللتان طورهما هايزنبرج وشرودنجر، كشف شرودنجر نفسه عن أنهما مقاربتان متعادلتان من جهة الرياضيات.

في أواخر عشرينيات القرن العشرين سعى بول ديراك وجون فون نيومان -كلٌّ بمفرده- إلى بث شيء من النظام في النظرية عن طريق تأسيس بنية رياضية مفردة لميكانيكا الكم، تكون متسقة منهجيًّا. لخَّص ديراك مقاربته في كتاب: (مبادئ ميكانيكا الكم) The Principles of Quantum Mechanics الذي نُشر لأول مرة في عام ١٩٣٠، ولخَّص فون نيومان مقاربته في كتاب: الأسس الرياضية لميكانيكا الكم Mathematical Foundations الذي نُشر في ألمانيا في عام ١٩٣٢. كانت مقاربتاهما مختلفتين إلى حدٍّ ما، كما وجَّه فون نيومان انتقادًا إلى بعض أوجه رياضيات ديراك، إلا أن هيكل الرياضيات الذي يُدرَّس إلى الطلاب اليوم بزغ من هاتين المقاربتين.

تتلمذ فون نيومان على يد عالم الرياضيات العظيم ديفيد هيلبرت، أطَّر هيلبرت في محاضرة ألقاها في المؤتمر الدولي لعلماء الرياضيات في

باريس عام ١٩٠٠ لقائمة طويلة من المعضلات الرئيسية التي اعتقد أنها سوف تشغل الجيل التالي من علماء الرياضيات الرواد. صارت القائمة معروفة باسم «معضلات هيلبرت». تُعني سادس هذه المعضلات بالمعالجة الرياضية للفيزياء. ذهب هيلبرت إلى أن علماء الرياضيات في المستقبل سوف يستهدفون معالجة العلوم الفيزيائية بالطريقة نفسها التي يعالجون بها الهندسة، وهو ما يعني تأسيس الفيزياء على مجموعة من المسلَّمات.

إن المسلَّمات هي حقائق واضحة بذاتها، تُفتَرض من دون برهان، وتمثل أسس البنية الرياضية التي تُستقى منها. من ثم يقع الدليل على صحة المسلمات في اتساق البنية وصحة النظريات التي يمكن استنباطها منها. مَثَّل منهج هيلبرت المُسَلَّماتي دافعًا غير عادي، يقصد إلى التخلُّص من أي شكلٍ من أشكال الاستدلال البدهي من الرياضيات، ذاهبًا إلى أن الموضوع مهمٌّ جدًّا للغاية كي تكون حقائقه على أي صورة بخلاف أن تكون متأصلة فيه. لو طبَّقنا ذلك على الفيزياء، يتطلَّب الأمر صرامة واتساقًا في الرياضيات، يؤديان لا محالة إلى زيادة مربكة في الترميز والتجريد الغامض. حذَّر باولي في مراجعته لكتاب ديراك (مبادئ ميكانيكا الكم) من أن صورية ديراك المجردة وتركيزه على الرياضيات على حساب الفيزياء يحمل «خطرًا محددًا، يتمثَّل في ابتعاد النظرية عن الواقع»[1]. صار من المستحيل إلى حدٍّ كبيرٍ على أي واحد متوسط

(١) Wolfgang Pauli, [review of Dirac, The Principles of Quantum Mechanics], Die Naturwissenschaften, 19 (1931), 188–9, quoted in Helge Kragh, Dirac: A Scientific Biography (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990), p. 79.

الذكاء بلا تدريب نظامي على الرياضيات والمنطق أن يستوعب ملامح الفيزياء الحديثة بشكلٍ كاملٍ.

في الحقيقة، إنك على ألفة تامة بالفعل مع المسلمات القليلة الأولى لميكانيكا الكم، وذلك من قراءتك للفصل الأول.

نبدأ بهذه المسلمة:

مسلمة #١: تحدد دالة نظام ميكانيكي كمي حالة هذا النظام بالكامل.

بمعنى آخر، ميكانيكا الكم مكتملة رياضيًّا، مثلما يجب أن تكون حقًّا، إذا كان لها أن تضطلع بدور نظرية الفيزياء التأسيسية، وهو الأمر الذي أرَّق أينشتاين، أدعو هذه المسلَّمة بمسلَّمة «لا شيء هنا كي نراه».

مسلمة #٢: تُمَثِّل فئة محددة من المؤثرات الرياضية الأشياء القابلة للقياس في ميكانيكا الكم.

ومرة أخرى، لا أعرض تقديم تفاصيل ما يُقصد هنا «بفئة محددة». إنَّ كل ما نحتاج إلى معرفته هو أن كل هذه المؤثِّرات مناسبة بشكلٍ خاص لمهمة استخلاص قيم الأشياء القابلة للرصد من الدالة الموجية. أنظر إليها على أنها مسلَّمة «مجموعة المفاتيح الصحيحة». من أجل الحصول على أشياء قابلة للرصد على غرار الزخم والطاقة، نحتاج إلى فتح الصندوق الذي تمثِّله الدالة الموجية. تتطلَّب الأشياء المختلفة القابلة للرصد مفاتيح مختلفة، تُسحَب من المجموعة الصحيحة.

مسلمة #٣: نحصل على القيمة المتوسطة للشيء القابل للرصد من خلال قيمة التوقُّع للمؤثر المقابل له.

تخبرنا هذه المسلَّمة كيف نستخدم المفاتيح. أنظر إليها على أنها مسلَّمة «افتح الصندوق»، إنها الوصفة التي نستخدمها كي نصل إلى الأشياء القابلة للرصد نفسها.

إذا كانت نظرية الكم نظرية تنبؤية مفيدة، فمن الواضح أننا في حاجة إلى معرفة كيف نستخدمها:

مسلمة #٤: تُستقى احتمالية أن يسفر قياس عن نتيجة محددة من مربع الدالة الموجية المقابلة[١].

تُعرَف هذه المسلمة باسم «قاعدة بورن»[٢]، أو يمكنكَ النظر إليها على أنها مسلمة «ما الذي قد نحصل عليه؟»، لو كنت تحبذ هذا. لاحظ أننا عندما نطبق هذا على التراكب الكمي لاثنين أو أكثر من النتائج المحتملة، فإنه لا يقول ما الذي نحصل عليه في أي قياسٍ منفردٍ.

(١) ومرة أخرى، تقصِّيًا للوضوح، تَذَكَّر من الفصل الأول أننا استخدمنا مربع معامل الدالة الموجية.

(٢) توخيًا للدقة، تتعلَّق قاعدة بورن باحتمالية العثور على الجسيم المرتبط بالدالة الموجية في موضع محدد في المكان. إلا أن استنباط احتماليات الحصول على نتائج قياس معينة من مربع الدالة الموجية الكلية ينطوي على المعالجات نفسها تقريبًا. إن ما يهم هنا هو حصولنا على الاحتماليات من مربعات الدوال الموجية المُضَمَّنة، ولذلك سوف أستمر في إطلاق اسم «قاعدة بورن» على هذا، من أجل التسهيل.

ثمة مسلَّمة أخرى في إطار العمل الرئيسي، تتعلَّق بالطريقة التي نتوقَّع بها تغيُّر الدالة الموجية في الزمن:

مسلمة #٥: في نظامٍ مغلقٍ، لا تؤثر عليه مؤثرات خارجية، تتطور الدالة الموجية في الزمن وفق معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن.

يعني هذا أنه بمجرد نشأة الدالة الموجية، تتطور بطريقة مستمرة وحتمية يمكن التنبؤ بها، تتحدد خواصها بالكامل في لحظة ما عن طريق خواصها في اللحظة السابقة لها. فكر في الدالة الموجية لإلكترون، تتطور بسلاسة في الزمن بينما تمر عبر شقين، مكونة «صدر موجة»، يتنقل بين سعة كبيرة وصغيرة والصفر نتيجة للتداخل، كما هو موضحٌ في شكل ٥أ. هذه هي مسلمة «كيف تنتقل من هنا إلى هناك».

لا مكان هنا لهذا النوع من اللا اتصالية الذي نربطه بعملية القياس. وكما فهم فون نيومان الأمر، يدفعنا القبول بالمسلمة #٥ إلى تبني مسلَّمة أبعد (إلا أنها على صلة بالأمر)، نفترض فيها أن الدالة الموجية تمثل تراكبًا للعديد من احتمالات القياس التي تنهار كي تعطي نتيجة مفردة.

لا نحتاج بالطبع إلى القيام أبدًا بمثل هذا الأمر في الميكانيكا الكلاسيكية.

تُعنى مسلمات إقليديس الهندسية بخواص الخطوط المستقيمة والدوائر والزوايا القائمة، وسوف أدافع عن أنها تُوَفِّي بمعيار الحقيقة

الواضحة بذاتها. إلا أنه ما من شيء خاص واضح بذاته في مسلمات ميكانيكا الكم.

أظن أن هذا لا يكاد يكون مفاجئًا، إن صياغة ميكانيكا الكم مجردة وغامضة، بينما الهندسة الإقليدية مألوفة.

تترك هذه المسلمات الأسئلة بخصوص الواقع أو الدالة الموجية من جهة أخرى مفتوحة، إنها في النهاية رياضيات وليست فلسفة. لكنني أظن أنه من المفيد الانتباه للكيفية التي امتُصت بها العقائد الأساسية لتفسير كوبنهاجن في البنية المُسَلَّماتية لميكانيكا الكم. مثلما يستحيل تمامًا أن تكون الحقائق التجريبية خالصة من نظرية ما، نحتاج إليها من أجل تفسيرها، يستحيل أن تكون النظرية خالية بالكامل من التصورات الميتافيزيقية المسبقة التي تساعد في ميلادها. ليست الصياغة الرياضية المعيارية لميكانيكا الكم بالشاهد المحايد بالكامل على الجدل الذي سيأتي لاحقًا.

إنها لعبة النظريات العظيمة. دِعنا نرى الآن كيف مارس الفيزيائيون هذه اللعبة على مدار السنوات التسعين الماضية أو قرابة ذلك.

* * *

الجزء الثاني

ممارسة اللعبة

الفصل الخامس

ميكانيكا الكم مكتملة

لذا اخرس وقُم بالحسابات

المشهد من سيلا:

إرث كوبنهاجن وميكانيكا الكم العلائقية ودور المعلومات

أظهرت المراسلات بين أينشتاين وشرودنجر أنه بحلول صيف عام ١٩٣٥ أصبح تفسير كوبنهاجن المعتقد الأساسي بالفعل. صار من المؤكد فعليًّا أنها الطريقة الأساسية التي يفكر بها الفيزيائيون في ميكانيكا الكم. كان شرودنجر سعيدًا بورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية لأنها «دعت ميكانيكا الكم الدوجمائية علنيًّا إلى تقديم كشف حساب»[١]. وصف أينشتاين تفسير كوبنهاجن بأنه «تلمودي»، فلسفة «إيمانية» لا يفسرها إلا كهنة مؤهلون فقط، يلحُّون على حقيقتها الجوهرية، ولا يقبلون السجال[٢].

---

(١) Erwin Schrödinger, letter to Albert Einstein, 7 June 1935. Quoted in Arthur Fine, The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory, 2nd edition (University of Chicago Press, Chicago, 1996), pp. 66–7.

(٢) Albert Einstein, letter to Erwin Schrödinger, 19 June 1935. Ibid., p. 69.

دعا الفيلسوف كارل بوبر ذلك «انشقاقًا»[1]:

لعلَّ أحد ملامح هذا النقاش الجديرة بالملاحظة نشأة انقسامٍ في الفيزياء. بزغ شيء يمكن وصفه في غير تزيُّد على أنه مذهبٌ كمي: إنه حزبٌ من نوعٍ ما أو مدرسة أو مجموعة يقودها نيلز بور، يدعمه بفعالية شديدة هايزنبرج وباولي، ويتعاطف معه بصورة أقل فعالية ماكس بورن وباسكوال جوردان وربما حتى ديراك. بمعنى آخر، انتمت كلُّ الأسماء العظيمة في النظرية الذرية إلى هذا المذهب، باستثناء رجلين عظيمين، عارضاها بشدة وباستمرار: ألبرت أينشتاين وإرفين شرودنجر.

إن هذا كلَّه بائسٌ تمامًا بالفعل. إذ إن التفسير اختُلِق من خلال تحالف مضطرب بين بور وهايزنبرج، بوساطة من باولي، كان الأمر دائمًا شكلًا من أشكال التسوية. يستخدم الكثير من الفيزيائيين ميكانيكا الكم يوميًا وبشكل روتيني من دون قلق زائدٍ حول ما تعنيه، أو انزعاج بخصوص أنه «لا شيء هنا كي نراه». إلا أنه يمكننا أن نقول بخصوص أولئك العلماء الذين يفضِّلون الحفر أعمق قليلًا قبل أن يجترحوا تفسيرًا لا واقعيًا مثل هذا (وأعترف أن نسبتهم أقل)، إن تفسير كوبنهاجن يفشل في إرضائهم. إذ يبدو أنه يجيب عن كل سؤال بأسئلة أكثر، لا إجابة لها. يفضي هذا التفسير إلى لبْسٍ وتشوش، وعندما يجتمع بالمستويات

(1) Karl R. Popper, Quantum Theory and the Schism in Physics (Unwin Hyman, London, 1982), pp. 99–100.

المفرطة للتجريد الرياضي -التي يُعزى السبق في إدخالها إلى النظرية إلى ديراك وفون نيومان- يجعل ميكانيكا الكم غير قابلة للفهم حقًّا، حتى بالنسبة إلى العديد من العلماء.

عنى إصرار بور على مبدأ التكامل أن النقاشات حول التفسير سرعان ما تحولت إلى نقاشات حول قصور اللغة التي نستخدمها لوصف الأنظمة الكمية، ووصف العلاقات فيما بين تلك الأنظمة الكمية والجهاز الكلاسيكي الذي يستخدم لإجراء القياسات عليها. رسم كذلك خطًّا بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي وهو خطٌّ يبدو عبثيًّا تمامًا - فأين من المفترض أن ينتهي العالم الكمي؟ وأين يبدأ العالم الكلاسيكي؟ عند مستوى الذرات والجزيئات؟ أم عند مستوى القطط؟ دعا جون بيل هذا «بالانقسام الخادع» shifty split[1].

إنني على يقينٍ بأن هذا بدا معقولًا تمامًا في ذلك الوقت. من المحتمل أن بور وهايزنبرج كليهما لم يتوقَّعا قدرات التجريبيين الموهوبين، وتطوير أجهزة ذات دقة وتعقيد مذهلين، جرى إعدادها من أجل الاضطلاع بمحاولة الإجابة عن هذه الأسئلة بعد أربعين أو خمسين عامًا. وكما سوف نرى في الفصول التالية، استطاعت الأجيال اللاحقة من الفيزيائيين القيام بقياسات على الأنظمة الكمية بطرقٍ لم تحلم بها فلسفة الكهنوت الدنماركي.

---

(١) John Bell, quoted by Andrew Whitaker, John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics: Vision and Integrity (Oxford University Press, Oxford, 2016), p. 57.

لم يكن التكامل وقصور الأجهزة الكلاسيكية حصينين ببساطة ضد المستقبل، وهما بندان رئيسيان في تفسير كوبنهاجن.

إلا أن هذه الأمور ما هي إلا مشتتات بالفعل. هي غير جوهرية أبدًا بالنسبة إلى لبِّ حجة بور، التي تقول إن العالم الكمي «متعذر على الفهم». على خلاف العالم الكلاسيكي، الذي وصلنا إلى قناعة بأنه قابلٌ تمامًا للفهم – إذ إن مفاهيمه الأساسية على غرار الزخم والطاقة، ماثلة «على سطح» المعادلات مباشرة – يقبع العالم الكمي فيما وراء ما يمكننا بلوغه. هذا هو التصور الميتافيزيقي المسبق الرئيسي الكامن في قلب تفسير كوبنهاجن. يقول هذا التصور إننا في فيزياء الكم نكافح ضد قيدٍ أساسي. لقد اصطدمنا بالحاجز الذي يُفرِّق بين الأشياء في نفسها وبين الأشياء التجريبية كما تبدو.

ما الذي يحدث بعد ذلك إذا تخلينا عن التصورات الإضافية؟ ما الذي يحدث إذا قبلنا بأن تفسيرنا لا تعوقه توصيفات لغتنا الكلاسيكية أو تقيِّده طبيعة أجهزة القياس الخاصة بنا؟ إن كل ما نحتاج إليه الفصل بين خبرتنا بفيزياء الكم وبين الطريقة التي نختار تمثيلها بها في أي لغة نظن أنها مناسبة. بمعنى آخر، بدلًا من أن نكون فعليًّا غير واضحين بخصوص الفرضية #٣، نجتاز السور ونرفضها صراحة، نأخذ القليلَ من بور والكثيرَ من هايزنبرج.

وهذا هو ما قام به المُنَظِّر المعاصر كارلو روفيللي. قضى روفيللي حياته المهنية بالكامل كفيزيائي نظري مطارِدًا نظرية كمية للجاذبية. وهو مجهود يُعنى في الأساس بالعثور على سبيل إلى توفيق أنجح

نظريتين تأسيسيتين في الفيزياء - ميكانيكا الكم ونظرية أينشتاين النسبية العامة. تصف ميكانيكا الكم قواعد العالم الصغير جدًّا. تدعم نظرية الكم النموذج القياسي الحالي لفيزياء الجسيمات متمثلة في صورة العديد من نظريات المجال الكمي. لم يكن اكتشاف بوزون هيجز في سيرن CERN بجنيف في عام ١٩١٢ إلا أحدث انتصارات النموذج القياسي العديدة. أما نظرية أينشتاين النسبية العامة فهي بالأساس نظرية مكان وزمان. تصف كيف تتسبَّب الكتلة - الطاقة في حني الزمكان، مؤدية إلى الظاهرة التي ندعوها «جاذبية». إن نظرية النسبية العامة هي أساس النموذج القياسي الحالي لانفجار الكون العظيم، ولم يكن رصد موجات الجاذبية في عام ٢٠١٥ إلا أحدث الانتصارات العديدة لهذه النظرية، وموجات الجاذبية هي تموجات في الزمكان تنتج عن حوادث عنيفة مثل اندماج ثقبين أسودين.

وكما شرح لي سمولين في كتابه «ثلاثة طرق إلى الجاذبية الكمية» Three Roads to Quantum Gravity -المنشور في عام ٢٠٠٠- ثمة ثلاث مقاربات محتملة، يمكن الأخذ بها. يمكنك البدء من ميكانيكا الكم والسعي إلى فرض القيود عليها حتى تُوَفِّي بمتطلبات النسبية العامة الصارمة. أو يمكنك البدء بالنسبية العامة والعثور على طريقة «لتكميمها» - وهو ما يسفر عن نظرية فيها المكان والزمان أنفسهما كميان في طبيعتيهما. أو يمكنك البدء من جديد باحثًا عن نظرية جديدة، تفرض نظريتا الكم والنسبية العامة كلاهما قيودًا عليها. يعد روفيللي وسمولين من بين المهندسين الرئيسيين لنظرية تُعرف بالجاذبية الكمية

الحلقية loop quantum gravity، المصاغة عن طريق اتخاذ طريق يبدأ من النسبية العامة[1].

لا نحتاج إلى أن نقول إن ميكانيكا الكم هي الأساس الذي سوف تنبني عليه نظرية كمية تفصيلية للجاذبية، يمثل الغموض التام بخصوص مسألة تفسيرها ومعناها عائقًا ضخمًا. ومن المثير أن روفيللي وسمولين كليهما يقصدان إلى التعبير عن نفسيهما بوضوح، إلا أن تفسير ميكانيكا الكم هو إحدى معضلتين في الفيزياء الحديثة، يختلفان بشأنهما (المعضلة الثانية التي يختلفان بشأنها هي واقع الزمان).

في الحقيقة، اعتبر روفيللي ميكانيكا الكم نظرية ثورية للغاية، لم ينظر إليها أبدًا على أنها غير متسقة أو غير مكتملة من أي وجه. في بداية تعاونهما، جمع بينهما عالِم الفيزياء الرياضية لويس كرين في نقاشٍ عميقٍ. تبادلوا الأفكار حول العلاقة بين عناصر الواقع والراصد، وفلسفة ليبنتز، وميكانيكا الكم. يوضح سمولين: «ما أتذكره أننا تناولنا جميعًا الأفكار الرئيسة وبنينا نظريات تعبِّر عن فكرة تذهب إلى أن ميكانيكا الكم «علائقية»»[2].

---

(١) يمكنكَ العثور على المزيد عن روفيللي وسمولين والجاذبية الكمية الحلقية في كتاب جيم باجوت «المكان الكمي: الجاذبية الكمية الحلقية والبحث عن بنية المكان والزمان والكون» Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time and the Universe، الذي نشرته مطابع جامعة أكسفورد في عام ٢٠١٨.

(٢) Lee Smolin, personal communication, 21 June 2017. Quoted in Jim Baggott, Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe (Oxford University Press, Oxford, 2018), p. 245. The italics are mine.

سعى أينشتاين في أثناء تطوير نظريته النسبية إلى نفي المفاهيم الميتافيزيقية بخصوص المكان والزمان المطلقين تمامًا عن الفيزياء. تمثَّلت إحدى تداعيات ذلك في أن الراصد وُضِع من جديد بحزم داخل الصورة، يقوم بقياسات باستخدام عصِيّ القياس والساعات، ويجري أرصادًا بداخل الواقع الفيزيائي ليفحصه من خلالها، بدلًا من أن يجري أرصاده من منظور متفرد ما، من «منظور ربوبي» علوي للكون. ومما يستحق الذكر، أننا لا نقصد «بالراصد» راصدًا بشريًّا بالضرورة. من الكافي أن يكون ثمة شيء (أي شيء) يمكن أن يؤسس معه النظام الفيزيائي نوعًا ما من العلاقات. وبدلًا من أن نتعامل مع الأشياء الميتافيزيقية في نفسها، فإننا نتعامل مع الأشياء التي في علاقة مع أشياء أخرى. إذا كانت العلاقة مع راصد بشري، إذن يمكننا الحديث عن الأشياء كما تبدو، إذا كانت العلاقة مع جهاز ما مثل عصا القياس أو الساعة، إذن يمكننا الحديث عن الأشياء كما تُقاس.

يلعب الراصد دورًا مهمًّا بشكل جوهري في ميكانيكا الكم أيضًا. ومثلما رفض أينشتاين مفهوم إمكانية وجود مطلقات في المكان والزمان، اختار روفيللي رفض المفهوم الذي يذهب إلى وجود ميكانيكا الكم في حالة مطلقة مستقلة عن الراصد. بمعنى آخر، في ميكانيكا الكم العلائقية، لا يمكننا اكتشاف أي شيء على الإطلاق عن الحالات الكمية الفيزيائية في نفسها. كتب: «يتمثل المُقترَح... في أنه عندما نتخلى عن مثل هذا الطرح (لصالح مفهوم أضعف عن حالة -وقيم الكميات الفيزيائية-

«بالنسبة إلى» شيء ما) تصبح ميكانيكا الكم أكثر معقولية»[1].

لا يرفض روفيللي -عند قيامه بمثل هذا الجزم- وجود واقع موضوعي أو يرفض واقعية الكيانات «غير المرئية» مثل الإلكترونات. إنه يقبل الفرضية #١ و#٢. ثمة أشياء موضوعية في نفسها، ذات وجودٍ مستقلٍّ - ثمة أشياء مثل الإلكترونات، وهي تواصل الوجود عندما لا ينظر إليها أو يفكر فيها أحد، إلا أننا لا نستطيع اكتشاف أي شيء عنها، مثلما قال كانط. إنها لا تُعقَل إلا عند الحديث عن حالاتها وخواصها الكمية عندما تؤسس لعلاقة مع نظام آخر. يدفعنا هذا إلى التساؤل عن صلاحية الفرضية #٣: تختص ميكانيكا الكم بالعلاقات بين الأشياء، لا بالخواص الواقعية للأشياء الفيزيائية الواقعية المستقلة عن العلاقات.

هكذا إذا كانت المعادلات الرياضية التي نستخدمها في ميكانيكا الكم لا تدل على الحالات الفيزيائية الواقعية الموجودة بصورة مستقلة والخاصة بالأنظمة الكمية، فعلى ماذا تدل إذن؟ أجاب روفيللي أنها تدل على «المعلومات» الخاصة بالنظام الكمي والتي نستقيها من خبرتنا به.

لا يتطلب تفسير روفيللي العلائقي بأي حال عزو أي دلالة خاصة لعملية القياس؛ إذ يرى أن القياس ما هو إلا طريقة واحدة من بين طرق مختلفة عديدة لتأسيس العلاقات الضرورية لميكانيكا الكم. إلا أن القياس بالطبع جوهري من حيث إنه الوسيلة إلى اكتساب معرفة بالأنظمة

---

(١) Carlo Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', International Journal of Theoretical Physics, 35 (1996), 1637; arXiv: quant-ph/9609002v2, 24 February 1997, p. 1.

الكمية، لذلك دعنا نحاول فهم هذا التفسير عن طريق المضي قدمًا خطوة بخطوة خلال عملية قياس نموذجية.

دعنا نفترض مرة أخرى أننا أعددنا نظامًا كميًّا، يتأسس على خبرتنا السابقة بالفيزياء وفهمنا السابق لها، يمكن أن يوجد في واحدة من حالتين محتملتين – ↑ و↓. دعنا نفترض أن ثمة نوعًا واحدًا من الجسيمات يتضمنها النظام، نشير إليها باعتبارها A. وكما نعرف، فإن الطريقة الصحيحة لوصف هذا النظام من خلال الدالة الموجية الكلية والتي تُصاغ في صورة تراكب كمي لمساهمتي دالة A الموجية في حالة ↑ ودالة A الموجية في حالة ↓:

كلية = $A_{\uparrow}$ + $A_{\downarrow}$

قبل أن نواصل، دعنا نتأمل من أين جاءت هذه الصياغة. نعرف من تجاربنا السابقة أننا إذا أعددنا نظامًا كميًّا على هذا النحو تمامًا، تقودنا خبرتنا بالفيزياء وفهمنا لها إلى توقُّع أنه قد يكون في إحدى هاتين الحالتين أو الأخرى. أو بدلًا من ذلك، إذا أسَّسنا علاقة من نوع معين بين النظام الكمي والجهاز الذي نستخدمه من أجل إعداده، نتوقع أنه قد يكون في حالة واحدة من هاتين الحالتين أو الأخرى. نعرف كذلك أننا من أجل القيام بتنبؤات صحيحة بالسلوك المستقبلي للنظام، نحتاج إلى تمثيل هاتين الحالتين في هيئة تراكبٍ كمي، نطلق عليه الدالة الموجية الكلية.

نستخدم معلوماتنا المستقاة من خبراتنا السابقة بالفيزياء كي نكتب الدالة الموجية الكلية للنظام الكمي في صورة تراكب كمي للحالتين ↑ و↓.

من المهم أن يكون استخدامي للغة واضحًا هنا، أستخدم كلمات مثل «أننا» و«معلومات»، قد يُفهم من هذه الكلمات أن الأمر كله مرة أخرى عن الراصدين البشريين والمعلومات بخصوص نتائج القياس التي قد تُسجَّل في دفاتر المعمل على سبيل المثال. ولمرة أخرى، ليس هذا المعنى المقصود. يشير روفيللي إلى «المعلومات» كثيرًا قاصدًا الدلالة الفيزيائية، فهي على صورة يمكن أن تظهر في الأشياء غير الحية: «للقلم على المنضدة معلومات لأنه يشير إلى هذا أو ذاك الاتجاه. لا نحتاج إلى كائن بشري أو قطة أو كمبيوتر من أجل استخدام هذا المفهوم عن المعلومات»[1].

والآن إذا كان إسهام الدالتين الموجيتين كلتيهما في التراكب الكمي متساويًا، يمكننا توقع أننا سوف نحصل في قياسٍ لاحقٍ إما على ↑ وإما ↓ باحتمالية متساوية (٥٠ : ٥٠). النتائج عشوائية: لا نملك وسيلة يمكن أن نعرف بها بشكلٍ مسبق أي نتيجة سوف نحصل عليها.

لكن ماذا لو قسنا خاصية أخرى، بدلًا من قياس خاصية ↑ أو ↓ للنظام؟ دعنا نطلق على هذه الخاصية + أو −. مرة أخرى، نعرف من خبرتنا المسبقة بالفيزياء وفهمنا المسبق لها أن نظامًا كميًّا يتكون من مجموعة جسيمات A أُعدَّ بحيث يكون في حالة ↑ حصريًّا، سوف يسفر في قياس لاحق عن + و− باحتمالية متساوية. بالمثل، سوف يسفر نظام كمي أُعدَّ بحيث يكون في حالة ↓ حصريًّا عن + و− باحتمالية متساوية.

---

(١) Rovelli, ibid., p. 3.

إذن، ما الذي نفعله الآن؟

تذكر من الفصل الأول أنه لا وجود لما يُسمَّى بالدالة الموجية «الصحيحة»، نحن في حرية تامة كي نختار صورة الدالة الموجية الكلية الأنسب للمسألة المحددة التي نحاول حلَّها. ما نحتاج إليه هو تراكب كمي مختلف، نحتاج إلى تراكب كمي ل + و−، بدلًا من ↑ و↓.

ويمكننا القيام بذلك بسهولة تامة، لا أريد أن أشتِّت انتباهك بالتفاصيل، يكفي أن أقول إننا نستخدم المعلومات من خبرتنا السابقة بسلوك أنظمة كمية مُعَدَّة حصريًّا في حالتي ↑ و↓ لاستنتاج أن

كلية = A_+ + A_-

أعترف أن هذا يبدو كأننا استبدلنا ببساطة الدالة الموجية ل + و− بالدالة الموجية ل ↑ و↓. لكن ثق بي عندما أخبرك أنه لا أهمية للكيفية التي يبدو عليها الأمر. ثمة بعض القواعد الرياضية الصارمة التي علينا اتباعها عندما نقوم بهذا النوع من التغيير. قد يساعد أن تعرف أن الحالات ↑ و↓ و+ و− يشار إليها غالبًا على أنها حالات أساس basis states، ولذلك فإن ما فعلناه هو تغيير أساس تمثيل الدالة الموجية الكلية. لا يوجد فعليًّا ما يُسمَّى أساسًا «صحيحًا» أو «مُفَضَّلًا». نستخدم معلوماتنا من خبرتنا السابقة بالفيزياء كي نغير الدالة الموجية إلى أي أساس على

صلة بالمسألة التي نبحث لها عن حل. غيرناها في هذه المرة إلى تراكب لقياس الحالتين + و−.

يتساوى إسهام الدالتين الموجيتين ل+ و−، مثلما كان الأمر في السابق، لذلك يمكننا توقع أننا سوف نحصل إما على + وإما − في قياس لاحق باحتمالية متساوية (٥٠ : ٥٠). ومرة أخرى، لا نملك وسيلة يمكن أن نعرف بها بشكل مسبق أي نتيجة سوف نحصل عليها.

اسمع مني، هذا كله صحيح تمامًا. نعرف (عن طريق الخبرة مرة أخرى) أنه عندما نقوم بسلسلة من القياسات على أنظمة مُعَدَّة بشكلٍ متماثلٍ، من المرجح أن نحصل على ترتيب عشوائي للنتائج على هذا النحو +، −، +، +، +، −، −، −، +، ... وعلى الرغم من أن كل القياسات المعملية عرضة للأخطاء التجريبية، فإننا نعرف كذلك أنه بعد القيام بعددٍ من القياسات ذي دلالة إحصائية، نحصل على + في ٥٠٪ من المرات و− في ٥٠٪ من المرات.

ما الذي حدث هنا بالضبط؟

يذهب روفيللي إلى أننا نستخدم الدالة الموجية ببساطة كطريقة مناسبة لتشفير معلوماتنا عن النظام الكمي. «على ذلك نجد أن (الدالة الموجية) التي نربطها بنظام... هي أولًا وقبل كل شيء مجرد تشفير لنتيجة هذه التفاعلات المسبقة مع (النظام)»[1]. نفعل هذا كوسيلة،

(١) Matteo Smerlak and Carlo Rovelli, 'Relational EPR', Foundations of Physics, 37 (2007), 427–45; arXiv:quant-ph/0604064v3, 4 March 2007, p. 3.

نستخدم فيها معلوماتنا المستقاة من خبرة سابقة من أجل القيام بتنبؤات بسلوك النظام في المستقبل، حال القيام بقياسات لم تتم بعد. تسمح لنا المعلومات المشفرة بالقيام بالتنبؤ بعلاقاتٍ لم تتشكَّل بعد.

بمعنى آخر، ليست الدالة الموجية واقعية، من منظور الفرضية #٣، ليست مفهومًا أساسيًّا، لا تمثل الحالة الفعلية للنظام الكمي. «في (ميكانيكا الكم العلائقية) لا تُفسَّر الحالة الكمية بشكلٍ واقعي، بل إن موضع الإلكترون عندما يرتطم بالشاشة... هو عنصر الواقعية (إلا أنه عنصر الواقعية بالنسبة إلى الشاشة)»[١]. إنما الدالة الموجية أداة بالكاد، تسمح لنا بربط الماضي بالمستقبل.

بحررنا رفض الفرضية #٣ في ميكانيكا الكم من كل أنواع التناقضات الظاهرة. عندما نُصَوِّر دالة موجية كلية في هيئة تراكب احتمالين، نعترف ببساطة أننا نعرف من خبرة سابقة أن النظام الكمي سوف يتمخض عن نتائج على غرار ↑ أو ↓، أو + أو −، بحسب نوع القياس الذي سوف نقوم به. يتعلق التراكب الكمي بالمعلومات، ولا يمثل حالات فيزيائية واقعية، مستقلة الوجود.

إذا كانت الدالة الموجية مجرد معلومات مشفَّرة، إذن فهي لا تحتاج إلى الخضوع إلى أي قوانين فيزيائية أو عمليات ميكانيكية. ليست المعلومات «محلية» أو «لا محلية». لا تتقيد في حد ذاتها بنظرية أينشتاين النسبية الخاصة (إلا أنه تُفرَض قيود شديدة على أي محاولة لإبلاغ هذه المعلومات). يمكن أن تتغير المعلومات لحظيًّا. لا تُجبَر دالة موجية

---

(١) Carlo Rovelli, personal communication, 14 October 2018.

تتكون من معلومات فقط على الخضوع لانهيارٍ فيزيائي غير متصل (في صورة قفزات) من نوعٍ ما. وكما فسَّر روفيللي: «لا يشكِّل هذا التغير أي إزعاج، إذ يحدث للسبب نفسه الذي يجعل معلوماتي عن الصين تتغير بصورة غير متصلة (في قفزات) عندما أقرأ مقالًا عن الصين في الصحيفة»[1].

لا يزيد هذا في غرابته عن الحَكَم الذي يرمي بالعملة في بداية مباراة كرة قدم أو تنس. يمكننا إذا أردنا تشفير نتيجتي هذه العملية في صورة تراكب «للملك» و«الكتابة». تلف العملة حول نفسها في الهواء وتستقر على الأرض، ونحصل على نتيجة «الملك». نعتقد أن النتيجتين المحتملتين تستمران في الوجود على جانبي العملة طوال الوقت، لكن بما أننا جهلة بالميكانيكا الدقيقة لحركة العملة في أثناء دورانها في الهواء، نلجأ إلى الاحتمالات. فإننا لا نميل إلى الإقرار بأن هذين الاحتمالين «ينهاران» إلى نتيجة واحدة عندما تتفاعل العملة مع الأرض، على الرغم من إمكانية الإقرار بذلك من حيث المبدأ.

في تفسير روفيللي العلائقي لميكانيكا الكم، قد نفهم الميكانيكا بشكلٍ دقيقٍ معقول داخل الحدود التي يفرضها مبدأ اللا يقين لكننا نفقد التبصُّر باحتمالات النتيجة، كما لا يمكننا أن نُحدِّث بشيء على الإطلاق عن الحالات الكمية الموجودة في استقلال حتى تُنشئ علاقة مع نظام آخر. وبالنسبة إلى إلقاء العملة الكمية، على الرغم من أننا نستطيع التنبؤ بالحركات الميكانيكية للعملة وهي في الهواء وعدد لفاتها حول نفسها،

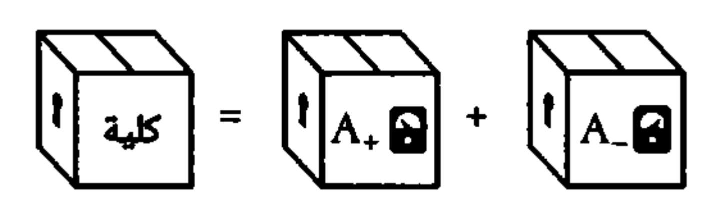
(١) Smerlak and Rovelli, 'Relational EPR', arXiv:quant-ph/0604064v3, p. 5.

فإن جانبي العملة لم يعودا موجودين الآن بشكلٍ مستقلٍّ إلا في علاقة عند تفاعلهما مع الأرض. نلجأ إلى الاحتمالات لأننا جهلة بالجانبين في نفسيهما. تمكننا فقط معرفة الجانبين على الأرض.

دعنا نمضي قدمًا انطلاقًا من هذا، إن الجهاز الذي نستخدمه لقياس حالتي النظام الكمي + و– مثله كمثل كل شيء مادي في الكون، مصنوعٌ كذلك من أشياء كمية «غير مرئية»، على غرار الذرات المكونة من كواركات وإلكترونات. افترض أننا أوصلنا الجهاز بعدَّادٍ له شاشة عرض ومؤشر. إذا وجدنا النظام عند القياس في حالة + يشير المؤشر إلى اليسار، إذا وجدنا النظام عند القياس في حالة – يشير المؤشر إلى اليمين.

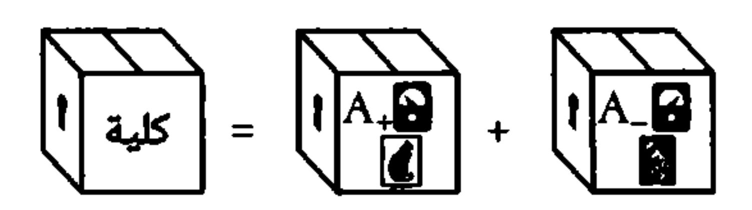
ما هو الوصف الميكانيكي الكمي الصحيح لهذا الوضع؟

حسنًا، يتوقَّف ذلك على ما إذا كنَّا ننظر إلى المؤشر. يشبه التمثيل الصحيح للدالة الموجية الكلية الآن شيئًا على غرار ما يلي، وذلك حتى نلقي بنظرة كي نرى إشارة المؤشر.



رأينا شيئًا يشبه هذا من قبل. أصبح النظام الكمي الأصلي وجهاز القياس «متشابكين» مع العداد. قبل أن ننظر كي نرى إلى أين ذهب المؤشر، يتخذ الملخص الصحيح المتاح للمعلومات شكلَ تراكبٍ آخر.

يبدو أن في إمكاننا المضي على هذا المنوال إلى الأبد، وهذا هو الأمر الذي أثاره شرودنجر من خلال مفارقته الشهيرة. إذا جهَّزنا العدَّاد بحيث تقتل إشارة المؤشر إلى جهة اليمين قطة موضوعة داخل صندوقٍ مغلقٍ، فهكذا نكون أقمنا تشابكًا بين النظام الكمي وجهاز القياس الأصلي والعدَّاد والقطة، لنحصل على



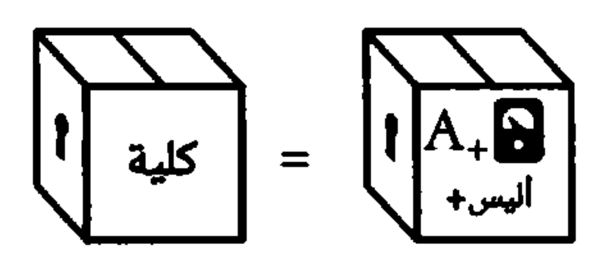
ولكي نكتشف حالة القطة، علينا إدخال جهاز آخر (أنا أو أنت) قادر على رفع غطاء الصندوق والنظر.

تصرُّ بداهتنا على أن قطة شرودنجر يجب أن تكون فعليًّا إما حية وإما ميتة قبل رفع الغطاء، إلا أن روفيللي هزَّ كتفيه لا مباليًا. بالتأكيد يمكننا تخمين الحالة الفيزيائية للقطة قبل «فعل القياس» لكننا لا نستطيع الهروب من حقيقة بسيطة: لا تمكننا معرفة حالة القطة حتى نؤسِّس علاقة معها، عن طريق رفع الغطاء، والنظر.

يكمن خطؤنا في اعتقادنا أن التراكب الكمي يمثِّل حالة القطة الفيزيائية –في اعتقادنا أن القطة المسكينة توجد في مظهرٍ من نوعٍ ما– بدلًا من أن يمثِّل ببساطة ملخصًا للمعلومات عن الوضع. لا يؤدي رفع الغطاء إلى انهيار الدالة الموجية من منظور فيزيائي ما، جرجرة القطة

من المطهر إلى حالة من الموات أو الحيوية. لا يوجد انهيارٌ فيزيائي، إن الشيء الوحيد الذي يتغيَّر عندما نرفع الغطاء هو حالة معرفتنا بالقطة، وكما قال روفيللي، هذا غير مزعجٍ.

إذن دعنا الآن نحظى ببعض المرح. أليس وبوب فيزيائيان تجريبيان يدرسان جوانب تأسيسية لميكانيكا الكم في معمل. يصل بوب متأخرًا، لذا تقوم أليس بقياسٍ في غيابه. تنظر إلى المؤشر وتلاحظ أنه تحرك إلى اليسار، مسجِّلًا نتيجة القياس +A. دوَّنت هذا في دفترها على أنه «+» (إذا كانت أبصرت المؤشر مشيرًا إلى الجهة الأخرى (اليمين) سوف تدوِّن «–»). نشير إلى هاتين النتيجتين على أنهما أليس+ وأليس–. إن حالة النظام الكمي بالنسبة إليها هي + من دون شكٍّ. تستنتج أن النظام الآن في الحالة التي تعطيها الدالة الموجية.



أمسك المشرف على البحث بتلابيب بوب في الممرِّ، يريد أن يعرف حالة النظام الكمي الذي أجرت عليه أليس التجربة للتوِّ. قد يبدو هذا ظالمًا بعض الشيء، إذ إن بوب لا يملك أي وسيلة للمعرفة، إلا أنه يعرف ميكانيكا الكم، واستغل معرفته بالنظام المدروس (الذي يتضمن أليس الآن) وهكذا شرح أن هذه الدالة الموجية تعطينا الحالة:



بالنسبة إلى بوب، فإن أليس والنتيجة التي كتبتها في دفترها متشابكتان الآن في الدالة الموجية الكلية. واصل وأخبر مشرفه أن ثمة احتمالية ٥٠٪ أن أليس قد رصدت + (يتجه المؤشر إلى اليسار، ودوَّنت «+» في دفترها)، واحتمالية ٥٠٪ أن أليس قد رصدت – (يشير المؤشر إلى اليمين، ودوَّنت «–» في دفترها). يبدو هذا كله معقولًا تمامًا. لا يستطيع بوب معرفة نتيجة القياس لأنه لم يكن في المعمل وقت إجراء القياس، إلا أنه لو فتح باب المعمل الآن وسأل أليس عن النتيجة التي حصلت عليها، فإن هذا يشكِّل «قياسًا» بالنسبة إلى بوب، يتضمن الدالة الموجية الكلية التي كانت أليس متشابكة فيها.

قبل أن يفتح بوب الباب، عزا بوب وأليس حالتين مختلفتين للنظام الكمي (دالتين موجيتين مختلفتين)، وهو ما قاد روفيللي إلى استنتاج أنه «في ميكانيكا الكم قد يفسِّر راصدون مختلفون سلسلة الأحداث نفسها تفسيرات مختلفة»[1].

سوف يبدو هذا كله بلا معنى على الإطلاق، لو اعتُبِرت الدالة الموجية واقعية فيزيائيًّا.

---

(١) Rovelli, 'Relational Quantum Mechanics', arXiv: quant-ph/ 9609002v2, p. 4.

يمكن تمديد هذا المنطق من دون صعوبة كبيرة ليشمل الوضع الذي تصورته ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية، الذي يتضمَّن جسيمين متشابكين، A وB، والحالتين الكميتين ↑ و↓. نعرف من الفصل الرابع أن الدالة الموجية الكلية لمثل هذا النظام هي كالتالي:

كلية = $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ + $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$

دعنا نفترض أن الجسيمين تحرَّكا مبتعدين أحدهما عن الآخر، تحرَّك A نحو اليسار وتحرك B نحو اليمين. ننتظر حتى يتحرَّكا مبتعدين لمسافة طويلة بحيث لا يعود بينهما اتصالٌ سببي، ما يعني أنه لا يمكن لأي تأثير فيزيائي أو معلومة لها تداعيات فيزيائية المرور من أحدهما إلى الآخر خلال الوقت المتاح[١]. نقوم بالقياسات في معملين منفصلين[٢]. ترصد أليس في المعمل على اليسار أن نتيجة قياس الجسيم A هي الحالة ↑.

ولأنها تعرف كيف جُهِّز النظام الكمي الأصلي، يمكنها تخمين أن الجسيم B يجب أن يكون في الحالة ↓، إلا أنه في اللحظة التي ترصد

---

(١) إلا إذا اتصل الجسيمان أحدهما بالآخر بطريقة ما بسرعات تفوق سرعة الضوء، وهو ما يخترق إحدى الفرضيات الأساسية لنظرية أينشتاين النسبية الخاصة (وهو ما لا يسعى أحدٌ في تمام قواه العقلية إلى القيام به).

(٢) سوف نرى في الفصل السابع كيف أجريت قياسات واقعية في معامل واقعية خصيصًا من أجل اختبار ميكانيكا الكم بهذه الطريقة.

فيها الجسيم A، لا يمكنها شخصيًّا معرفة حالة B، لأنها لم تؤسس علاقة معه. بالمثل، يرصد بوب في المعمل على اليمين أن نتيجة قياس الجسيم B هي الحالة ↓، إلا أن في إمكانه فقط تخمين أن الجسيم A يجب أن يكون في الحالة ↑ بسبب ذلك.

يستلزم تغيير هذا الوضع تفاعلًا آخر، يتضمن اتصال أليس وبوب أحدهما بالآخر من أجل أن يتشاركا النتائج. أو ربما يشارك الاثنان نتائجهما مع راصدٍ ثالث -دعنا ندعوه تشارلز- يستنتج من هذا أن حالتي الجسيمين مترابطتان حقًّا، حالة A هي ↑ وحالة B هي ↓. يستنتجون من ذلك أن القيام بقياسٍ على أي من A أو B يؤدي إلى انهيار الدالة الموجية الكلية كي تعطي النتيجة $A_{\uparrow} B_{\downarrow}$. يواصلون حكَّ رؤوسهم بينما يتأمَّلون في لا محلية الدالة الموجية الكلية والتأثير الشبحي عن بُعد الذي تستلزمه ميكانيكا الكم.

إلَّا أن روفيللي يذهب إلى خطأ هذه الطريقة في التفكير فيما يحدث هنا. إن كل ما تغيَّر بالفعل خلال هذا التسلسل هو طبيعة المعلومات المتاحة لأليس وبوب وتشارلز. عندما قامت أليس بقياسها أسَّست علاقة مع الجسيم A، وبالمثل عندما قام بوب بقياسه أسَّس علاقة مع الجسيم B، وهي علاقة مستقلة تمامًا عن علاقة أليس ب A.

ما من شيء لا محلي أو غامض أو شبحي في أي من هذا، إلا أننا قد نسأل عندئذٍ، كيف يتأسس الترابط بين A وB؟ هذا سهل. استخدم بوب وأليس ما يعرفانه من خبرة سابقة عن النظام الكمي المكوَّن من جسيمين، وشَفَّرا هذه المعلومات في الدالة الموجية الكلية. تذكر، ثمة

قانونٌ للحفظ، وهو ما يعني أن ثمة نتيجتين محتملتين فقط هما $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ و$A_{\downarrow}B_{\uparrow}$. يستبعد هذا القانون الاحتمالين $A_{\uparrow}B_{\uparrow}$ و$A_{\downarrow}B_{\downarrow}$ تحديدًا، وهو السبب وراء عدم تضمينهما في صياغة الدالة الموجية الكلية. بمعنى آخر، كانت المعلومات بخصوص الارتباط «مُحَمَّلة مسبقًا» في الدالة الموجية الكلية. هكذا يُرصَد الارتباط في المعملين بالفعل - بفضل اتصال آخر ينتقل بطريقة غير شبحية أبدًا بسرعاتٍ لا تزيد على سرعة الضوء - ويعكس ببساطة أن المعلومات قد شُفِّرت بشكلٍ صحيحٍ. كل ما قام به باحثونا أنهم أخذوا معلومات عن أحداث في الماضي واستخدموها للتنبؤ بنتيجة سلسلة من الأحداث اللاحقة.

يتطلَّب تفسير روفيللي دخول الأنظمة الكمية في علاقة قبل أن يصبح ممكنًا الحصول على معلومات ذات معنى عنها. إلا أن ثمة بدائلَ تركز حصريًا على طبيعة المعلومات المرتبطة بالأنظمة الكمية، وهي تعرف في العموم بتفسيرات نظريات المعلومات.

طرح الفيزيائي أنطون تسايلنجر -مقتفيًا إشارات من الاتجاه الوضعي لهايزنبرج- أن ميكانيكا الكم نظرية عن المعلومات بالأساس، ما ندعوها خواصًا فيزيائية في ميكانيكا الكم هي فعليًا فرضيات تتعلَّق بهذه المعلومات المستقاة من خبرة سابقة. يمكن تحديد صحة أو خطأ مثل هذه الفرضيات بعدئذٍ من خلال الأرصاد المستقبلية. كتب تسايلنجر: «لذلك فالجسم في الحقيقة هو بناءٌ مفيدٌ يربط الأرصاد»[1].

(1) Anton Zeilinger, 'A Foundational Principle for Quantum Mechanics', Foundations of Physics, 29 (1999), 633.

في ميكانيكا الكم، لا تكون كل الفرضيات صحيحة معًا في الوقت نفسه - «يعرض هذا النظام معلومات تخصُّ مسارًا خطيًّا لجسيم» و«يعرض هذا النظام معلومات تخصُّ تداخلًا موجيًّا»، يستحيل أن يكون الاثنان صحيحين في الوقت نفسه بالنسبة إلى النظام نفسه، يعني هذا أن كمية المعلومات قاصرة أو مقيدة بالضرورة.

يُعَرِّف تسايلنجر النظام الكمي الأولي على أنه نظامٌ يحمل معلومات كافية لتحديد حقيقة فرضية واحدة فقط. قد تمتلك الأنظمة الكمية عددًا من الخواص الفيزيائية التي تُصَنَّف باعتبارها متضادات قطبية، على غرار الموجب أو السالب (+ أو −)، علوي أو سفلي (↑ أو ↓)، يسار أو يمين. يمكننا التفكير فيها على أنها «إيقاف» أو «تشغيل»، على أنها أعداد في نظام عدٍّ ثنائي، ٠ أو ١، تُعرف في علوم الحاسب باسم «بِتّات» bits. لذلك فالنظام الكمي الأولي يحمل «بِتَّة» واحدة فقط من المعلومات. يعتمد ما نحصل عليه الآن على نوع السؤال التجريبي الذي نسأله عن النظام.

فكر في نظام كمي مُعَدّ حصريًّا في حالة ↑. إذا جزمنا الآن بفرضية تذهب إلى أن «هذا النظام يعرض معلومات مُمَيِّزة للحالة ↑»، فإننا نصل إلى نتيجة «صحيحة». لكن ماذا إذا جزمنا بأن «هذا النظام يعرض معلومات مُمَيِّزة للحالة +؟ نحن ملزمون -كما سبق- بكتابة الدالة الموجية الكلية للنظام في صورة تراكب كمي لحالتي + و−. إلا أن المعلومات المتاحة في النظام الآن غير كافية لإعلان بسيط عن «الصحة» أو «الخطأ». إن النتائج عشوائية تمامًا بدلًا من ذلك. سوف تكون فرضيتنا

«صحيحة» في بعض المرات، و«خاطئة» في مرات أخرى، باحتمالية متساوية (٥٠ : ٥٠).

من الواضح أن في إمكاننا زيادة عدد الأنظمة الكمية الأولية، بحيث تكون قادرة على حمل معلومات كافية لتحديد حقيقة العديد من الفرضيات، وبحيث تتضمن العديد من البِتّات. إن حالة التشابك هي نظام من بِتّين يتضمن جسيمين، يتطلب فيه الارتباط المشترك للجسيمين أكثر من بِتّة واحدة. يمكننا بناء كامل ميكانيكا الكم بدءًا من بعض المبادئ البسيطة تمامًا لنظرية المعلومات.

تعتبر المعلومات الكمية في صياغة تسايلنجر تجليًا للخواص الكمية الباطنة، مثلما تعتبر درجة الحرارة تجليًا لحركة الذرات والجزيئات الباطنة. إلا أن المُنَظِّر جيفري بوب ذهب إلى أن المعلومات الكمية هي «عنصر بدائي» فيزيائي جديد، عنصر لا يمكن اختزاله في مجالات أو جسيمات فيزيائية[1]. لا يعتمد تفسير بوب للمعلومات على وجود الراصدين، بل تمثل المعلومات فيه عنصرًا أساسيًّا من عناصر الواقع نفسه. نتبنى في التفسير العلائقي تصورًا يذهب إلى أن الدالة الموجية تمثِّل معلومات عن النظام الفيزيائي، ولا تمثِّل النظام نفسه، وهو ما يوفِّر علينا كل التبعات المزعجة التي يبدو أن ميكانيكا الكم تقتضيها. إلا أنه مما يضاد البداهة تمامًا في الوقت نفسه فصل نظام كمي عن تمثلنا له. نكافح كي نقاوم إغراء أن نقرأ في تمثلنا ما يزيد على ما هو

(١) انظر: Jeffrey Bub, 'Quantum Mechanics Is about Quantum Information', Foundations of Physics, 35 (2005), 541–60. See also arXiv:quant-ph/0408020v2, 12 August 2004.

مُسَوَّغ. يتعاطف روفيللي مع ذلك. إن التصورات الميتافيزيقية المسبقة التي تتدفق من الفرضية #٣ تغلغلت في طبيعتنا بدرجة كبيرة، تطورت على مدار فترة معتبرة من ألفتنا بالميكانيكا الكلاسيكية. لا يعتبر الاعتقاد المسبق في واقعية المفاهيم الأساسية لتمثلاتنا إلا «فرضية فلسفية، ومن الواضح أن العلم يدين لها بالكثير»[١]، لكنها لا تعدو كونها فرضية.

وانظر إلى ما نحصل عليه عندما نكون جاهزين لرفضها؛ تتلاشى كل مشكلاتنا.

إلا أن التفسيرات العلائقية وتفسيرات نظرية المعلومات تتطلب نوعًا من المقايضة المؤثرة، وثمة ثمنٌ باهظٌ يجب دفعه. كي نحصد هذه المزايا علينا تخفيف قبضتنا على الواقع نفسه، كما يشرح روفيللي: «يسمح التخلي عن واقعية أينشتاين الصارمة للواحد أن يعفي نفسه من... الألعاب البهلوانية الذهنية»[٢]. يجب أن نرضي أنفسنا بما نستطيع اكتشافه عن الأنظمة الفيزيائية الكمية، وأن نستخدم الصورية الرياضية لتفسيرها بطرقٍ تسمح لنا بالتنبؤ بنتائج القياسات المستقبلية. نعرف أن هذا ينجح بشكلٍ مذهلٍ، لكن لا نتوقع أن هذا التفسير سوف يخبرنا بما يجري بالفعل.

ما الذي يحدث «فيزيائيًا» لإلكترون في رحلته من مدفع إلكترونات عبر حاجز له ثقبان نحو شاشة فوسفورية، حيث يُرصد على صورة بقعة مضيئة مفردة؟ ما الذي يحدث فيزيائيًا عندما يسفر نظام كمي له احتماليتا قياس

---

(١) Smerlak and Rovelli, 'Relational EPR', arXiv:quant-ph/0604064v3, p. 5.

(٢) Ibid., p. 4

عن نتيجة واحدة فقط للقياس؟ ما الذي يحدث فيزيائيًا لقطة شرودنجر قبل رفع الغطاء عن الصندوق والنظر إلى الداخل؟ ما الذي يحدث فيزيائيًا لكلا الجسيمين A وB عندما ترصد أليس أن A في الحالة↑؟ هل يوجد تأثير فيزيائي من أي نوع على الجسيم B في هذه التجربة؟

ببساطة لا توجد أي إجابات عن هذه الأسئلة بحسب التفسيرات العلائقية وتفسيرات نظرية المعلومات. ولا يرجع ذلك إلى افتقارنا إلى مهارة اكتشافها، بل لأن الأسئلة نفسها غير ذات معنى. لا توجد دلالة للحالة الكمية لإلكترون حتى يؤسس علاقة مع الشاشة الفسفورية، وحتى يحدث هذا لا يمكننا أن نقول شيئًا ذا مغزى عنه. لا يمكننا أن نقول شيئًا ذا مغزى عن نظام كمي له احتماليتا قياس حتى يؤسس علاقة مع جهاز القياس، حتى تكون ثمة نقطة نرى النتيجة الواحدة عندها. لا يمكننا أن نقول شيئًا ذا مغزى عن حالة قطة شرودنجر حتى نرفع الغطاء، ونؤسس علاقة معها. وبغض النظر عن النتيجة التي حصلت أليس عليها فيما يتعلق بالجسيم A، لا يمكننا أن نقول شيئًا ذا مغزى عن حالة الجسيم B حتى يؤسس بوب علاقة معه. لا يمكننا أن نقول شيئًا ذا مغزى عن حالة نظام الجسيمين A B حتى تؤسس أليس علاقة مع A، ويؤسس بوب علاقة مع B، ومن ثم يمضيان نحو تأسيس علاقة أحدهما مع الآخر. لا شيء هنا كي نراه.

أطلق جون ويلر وصفًا بارعًا على ذلك، جملة مناسبة تمامًا: «التنين العظيم الدخاني. (انظر شكل رقم ١٠). يبدو أن لنا عينًا على النظام الكمي في بداية التحول الفيزيائي –تمكننا رؤية ذيل التنين– وفي النهاية نعرف النتيجة. تمكننا رؤية رأس التنين، إلا أنه بين البداية والنهاية يبدو

أننا لا نستطيع أن نقول شيئًا ذا مغزى عن الفيزياء. يتعذَّر الوصول إلى جسم التنين، إذ إنه ملفوفٌ بضبابٍ كمي غامض.



شكل رقم ١٠: تنين ويلر الدخاني.

هل تذكر مقولة بور المقتبسة؟: «من الخطأ الظن أن مهمة الفيزياء اكتشاف كيف هي الطبيعة. تُعنى الفيزياء بما نستطيع أن نقوله عن الطبيعة»[١].

يتشابه هذا بشكلٍ دقيقٍ إلى حدٍّ كبيرٍ مع اقتباس من ألفريد جول آير، المتحدث البريطاني باسم نسخة الوضعية الخاصة بحلقة فيينا[٢]:

---

(١) Niels Bohr, quoted by Aage Petersen, 'The Philosophy of Niels Bohr', Bulletin of the Atomic Scientists, 19 (1963), 12.

(٢) A. J. Ayer, in A. J. Ayer (ed.), Logical Positivism, Library of Philosophical Movements (Free Press of Glencoe, 1959), p. 11. The italics are mine.

تكمن أصالة أرباب الوضعية المنطقية في أنهم جعلوا استحالة الميتافيزيقا لا تقوم على طبيعة ما يمكن معرفته بل على طبيعة ما يمكن قوله.

وإذا تفكرنا كذلك في تحذير لودفيج فتجنشتاين الشهير: «حيثما لا يستطيع الواحد الكلام، يجب عليه التزام الصمت»[1] نُقاد بلا رحمة نحو استنتاجٍ مشينٍ إلى حدٍّ كبيرٍ. إذا كنَّا لا نستطيع أن نقول شيئًا ذا مغزى عن الفيزياء لكننا نمتلك تمثلًا مرضيًّا تمامًا، يعمل بشكلٍ رائع للغاية، إذن ربما علينا أن نخرس ونقوم بالحسابات فقط.

وعلى الرغم من أن العبارة الأخيرة تُعزى كثيرًا إلى ريتشارد فاينمان فإن ديفيد ميرمين هو من صكَّها على الأرجح. عندما كان ميرمين طالبًا بحثيًّا يدرس ميكانيكا الكم في خمسينيات القرن العشرين، قابل أساتذته أسئلته حول المعنى والتفسير باستنكارٍ[2]:

«لن تحصل أبدًا على الدكتوراه إذا سمحتَ لنفسكَ بالتشتُّت بسبب مثل هذه الأمور الرعناء». استمروا في نصحي: «لذلك ارجع إلى عملكَ الجاد، واجلب بعض النتائج»، بمعنى آخر: «اخرس وقُم بالحسابات». وهو ما فعلتُه، وربما انتهيتُ إلى أفضل ما في هذا الشأن. عرفوا في هارفارد في تلك الأيام الخالية كيف يديرون حبًّا قاسيًا.

---

(١) Ludwig Wittgenstein, Tractatus Logico-Philosophicus, translated by C. K. Ogden (Kegan Paul, Trench, Trubner, London, 1922), p. 90. 19. N. David Mermin, 'Could Feynman Have Said This?', Physics Today, May 2004, pp. 10–11.

(٢) N. David Mermin, 'Could Feynman Have Said This?', Physics Today, May 2004, pp. 10–11.

بالنسبة إليَّ، يعتبر التفسير العلائقي وتفسير نظرية المعلومات لا واقعيين في صرامة من منظور الفرضية #٣. لكن دعنا نسأل سؤالًا مختلفًا وفي أذهاننا قلق هاكينج من الأحكام المبنية على التمثل فقط: هل التفسير العلائقي وتفسير نظرية المعلومات تفسيران سلبيان ببساطة، تفسيران مناسبان تجريبيًّا (ولذلك لا واقعيان)، أم أنهما أكثر إيجابية وفعالية وفق روح الفرضية #٤؟

تتمثَّل وجهة نظري في أنه إذا كانت الدالة الموجية هي معلومات مشفَّرة، جُمِعت من خلال خبرة سابقة بالظواهر الكمية، إذن فالتفسيران بالتأكيد تَمَثُّلان سلبيان إلى حدٍّ كبيرٍ. إذ كما رأينا، لا يمكنهما توفير أي أساس نقول بناء عليه أي شيء ذي مغزى عن الفيزياء التي تُوَلِّد المعلومات، وبذلك لا يوفران أي نبصر أو فهم أعمق. يمكننا القول إن هاتين المقاربتين لا توفران أي دافع للقيام بأي شيء بشكلٍ مختلفٍ، لأنه لا شيء هنا بالفعل كي نراه.

في هذين التفسيرين نُحَمِّل سفينة العلم بكل البيانات التجريبية التي جمعناها، نُشَفِّر هذا في تمثلاتنا السلبية، وننطلق في خطٍّ مستقيم نحو مياه سيلا الضحلة الصخرية، راضين بأداتية فارغة إلى حدٍّ كبيرٍ.



* * *

الفصل السادس

ميكانيكا الكم مكتملة

إلا أننا بحاجة إلى إعادة تفسير ما تقوله

إعادة النظر في الاحتمالية الكمية: المسلَّمات المعقولة والتواريخ المتسقة والبايزية الكمية (الكيوبيزمية) Qbism

إلى أين نذهب من هنا؟

على الرغم من تداعيات تفسير كوبنهاجن وتفسيريْ ميكانيكا الكم العلائقية ونظرية المعلومات، فإنه ما زلنا لا نرغب في اقتراح أن الصُّوَرِيَّة الكمية غير مكتملة بأي حالٍ. مع ذلك فهل هناك بعض العزاء يمكن الحصول عليه عن طريق البحث عن تفسير لما تقوله النظرية؟ يكفل لنا هذا فرصة تجنُّب إهدار الكثير من الوقت على المعادلات، إذ نعلم أنها تعمل بكفاءة تامة. بدلًا من ذلك، دعنا نبحث في إمعانٍ عمَّا قد تعنيه بعض الرموز في هذه المعادلات. لا يقودنا هذا بالضرورة إلى أن نتبنى موقفًا أكثر واقعية، إلا أنه قد يساعدنا على قول شيء له مغزى أكبر بخصوص الفيزياء الكامنة التي من المفترض أن تمثِّلها الرموز.

وكنقطة بداية، دعنا نعترف فقط بأن ميكانيكا الكم تبدو نظرية احتمالاتٍ، تتأصَّل فيها الاحتمالات، وهكذا تتأسَّس على مجموعة من

المسلَّمات. بدلًا من بذل الجهد بلا نهاية من أجل تفسير للنظرية، هل من الممكن إعادة بنائها بالكامل باستخدام مجموعة مختلفة من المسلَّمات، بطريقة تسمح لنا بربط مفاهيمها بمعنى أكبر؟

فكر المُنَظِّر لوسيان هاردي في ذلك بالتأكيد.

في عام ٢٠٠١ نشر ورقة بحثية على أرشيف ما قبل الطباعة arXiv وفيها عرض ما زعم أنها «المسلَّمات المعقولة الخمس» التي يمكن استنباط كل ميكانيكا الكم منها[١]. وهي لا تشبه المسلَّمات التي عرضتها قرب نهاية الفصل الرابع من أي وجه. تخلو من مسلَّمة الاكتمال أو «لا شيء هنا كي نراه»، تخلو من مسلمتي «مجموعة المفاتيح الصحيحة» و«افتح الصندوق»، ولا وجود لفرضية قاعدة بورن فيها كذلك.

ذهب هاردي إلى أن الملمح المنفرد الذي يميِّز ميكانيكا الكم عن أي نظرية فيزيائية أخرى هو طبيعتها الاحتمالية بالتأكيد. لذلك، لماذا لا ننسى كل شيء عن ازدواجية الموجة - الجسيم والدوال الموجية والمؤثرات والأشياء القابلة للرصد ونعيد بناءها في صورة نظرية احتمالات عامة؟ في الحقيقة تعمل المسلمات الأربعة الأولى من مسلمات هاردي المعقولة على تعريف بنية الاحتمال الكلاسيكي، وهو احتمال من النوع الذي نستخدمه في سرورٍ تامٍّ من أجل وصف النتائج التي نتوقعها من رمي العملة. تفترض المسلمة الخامسة أن التحول بين الحالات الكمية متصلٌ وقابلٌ للانعكاس، وهو ما يُوَسِّع الأسس كي

(١) Lucien Hardy, 'Quantum Theory from Five Reasonable Axioms', arXiv:quant-ph/0101012v4, 25 September 2001.

تضم إمكانية الاحتمال الكمي[1]. ثم تتدفق بقية ميكانيكا الكم من هذا، بما في ذلك قاعدة بورن.

للوهلة الأولى، تبدو مسلمة هاردي الخامسة مخالفة للبداهة إلى حدٍّ ما. إذ إنه في نظرية تميزها اللا اتصالية يبدو من الغريب افتراض أن التحولات بين الحالات الكمية تحدث بنمطٍ سلسٍ، متدفقٍ في اتصال. إلا أن هذا ضروري من أجل بناء سيناريو لا يمكن أن يحدث فعليًا في الفيزياء الكلاسيكية. يستحيل أن يتحوَّل «الملك» بصورة متصلة وقابلة للانعكاس إلى «كتابة» إلا أن الحالات الكمية ↑ و↓ يمكنها ذلك. تسمح مسلمة هاردي الخامسة بإمكانية التراكب الكمي والتشابك وكل المرح الذي يستتبع ذلك. ثم تُفسَّر اللا اتصالية الكمية بشكلٍ مباشرٍ على أنها تحول في معرفتنا من احتمالين (إما ↑ وإما ↓) إلى حقيقة واحدة، بالطريقة نفسها التي نرى بها العملة استقرَّت على الأرض و«الملك» إلى الأعلى.

تتبع ورقة هاردي تقليدًا من نوعٍ ما، يحاول إعادة بناء ميكانيكا الكم، أطلق نشرها شرارة اهتمامٍ متجددٍ بهذه المقاربة العامة. مع ذلك، لاحظ أن أي إعادة بناء لميكانيكا الكم في صورة نظرية احتمالات عامة قد يسمح لنا أن نقول أشياء ذات مغزى عن ما يدخل فيها وما يخرج منها، لكن ذلك لا يخبرنا أي شيء -مهما كان- عن ما يحدث بين الدخول

---

(١) أدرك هاردي بعد تدبُّرٍ أعمق أنه يستطيع الاستغناء عن مطلب التحوُّل المتصل. يكفي الجمع بين فرضية القابلية للانعكاس والمسلَّمة الثالثة من أجل جعل الاتصالية أمرًا حتميًّا.

والخروج. يشرح جوليو تشيريبيلا الأمر: «إن ماهية النظام الفيزيائي غير محددة ولا تلعب أي دور في النتائج». إن نظريات الاحتمالات على هذه الشاكلة هي «قواعد بناء النظريات الفيزيائية بمجرد أن ننزع عنها الدلالات»[1].

ما زال لا شيء هنا كي نراه.

قد نميل إلى استنتاج أن التسرع نحو اعتناق بنية احتمالية بالكامل يحمل مخاطرة أخذ الصالح بالطالح، إذ قد نفقد الفيزياء التي تحتوي عليها النظرية التقليدية. بدلًا من التخلُّص من كل المسلَّمات التقليدية، هل من الممكن أن نكون أكثر انتقائية قليلًا فقط؟

عُد وانظر إلى المسلَّمات المفصلة في نهاية الفصل الرابع والموجودة كذلك في الملحق. إذا كنَّا نقبل الفرضية التي تذهب إلى أن الدالة الموجية توفِّر وصفًا كاملًا (مسلَّمة #١)، إذن نحتاج إلى استكشاف شعورنا تجاه البقية. لا يبدو أننا قد نجني الكثير من مساءلة مسلمات «مجموعة المفاتيح الصحيحة»، أو «افتح الصندوق»، أو «كيف تنتقل من هنا إلى هناك»، إذ إنها ضرورية بالتأكيد إذا كنَّا سوف نحتفظ ببعض القدرة على التنبؤ وسوف نستخلص المعلومات الصحيحة من الدالة الموجية. يتحول انتباهنا لا محالة نحو المسلَّمة #٤، قاعدة بورن أو مسلَّمة «ما الذي قد نحصل عليه؟»، إذ إنها الموضع الذي نشعر بعدم الأمان عنده.

---

(١) Giulio Chiribella, quoted by Philip Ball in 'Quantum Theory Rebuilt from Simple Physical Principles', Quanta, 30 August 2017.

نميل في ميكانيكا الكمّ إلى تفسير قاعدة بورن من خلال الاحتمالات الكمية التي تحققت في لحظة القياس. والسبب في ذلك بسيطٌ ومباشرٌ تمامًا. سواء كنّا نفسر الدالة الموجية بشكلٍ واقعي أو لا، عندما نطبق معادلة شرودنجر الموجية نحصل على وصفٍ لحركة سلسة ومتصلة، وفقًا للمسلَّمة #٥. يمكن استخدام صورة الدالة الموجية في وقتٍ ما محدد من أجل التنبؤ بشكل الدالة الموجية في وقتٍ ما لاحق. من هذا المنطلق، تعمل معادلة شرودنجر بالطريقة نفسها تقريبًا التي تعمل بها معادلات الحركة الكلاسيكية. فقط عندما نُدْخِل تفاعلًا أو انتقالًا من نوعٍ ما يغير حالة النظام الكمي، نواجه اللا اتصالية - «يقفز» الإلكترون إلى مدارٍ ما أعلى في الطاقة، أو تنهار الدالة الموجية إلى إحدى نتائج القياس أو الأخرى، إذ يرمي الله النرد مرة أخرى إضافية. لا تظهر هذه اللا اتصالية في أي مكانٍ في معادلة شرودنجر - إذ لا يمكنها الظهور ببساطة.

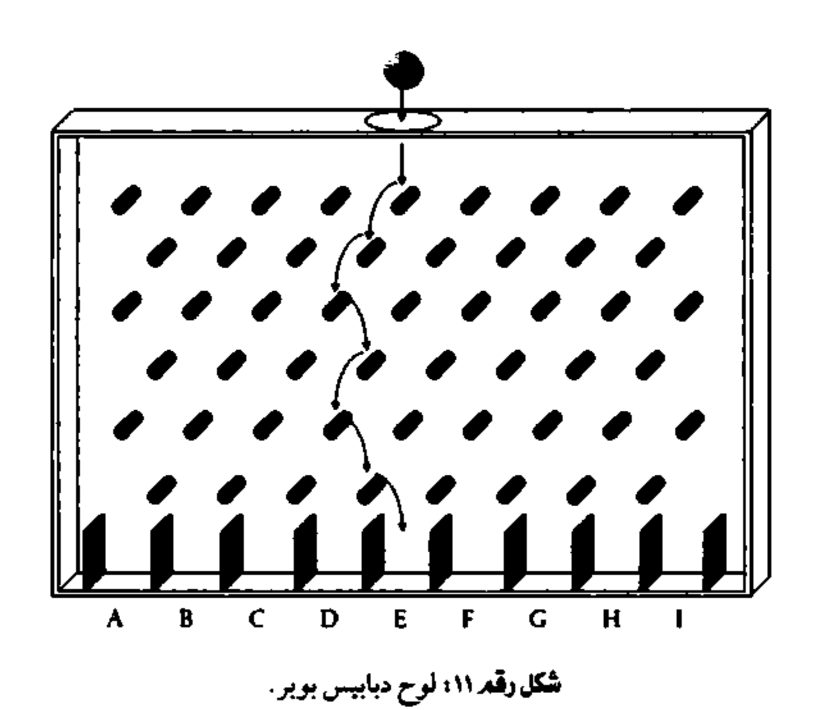
هذا هو السبب وراء طرح قاعدة بورن كمسلَّمة. لا يوجد شيء في الصُوَريَّة نفسها يخبرنا بشكلٍ لا لبْس فيه أن الطبيعة تعمل على هذا النحو. نطبق قاعدة بورن لأن هذه هي الطريقة التي نحاول بها تعقل عدم قابلية ميكانيكا الكم للتنبؤ بها، وهو الأمر المتأصِّل فيها. لنظام كمي نتيجتا قياس محتملتان، لكننا لا نستطيع التنبؤ بشكلٍ مؤكد بنتيجة القياس التي سوف نحصل عليها عند القيام بكلِّ قياسٍ منفرد. نستخدم قاعدة بورن في محاولة لإخفاء جهلنا والتظاهر بأننا نعرف بالفعل ما يجري. يتمثَّل السبيل الوحيد للقيام بهذا في افتراض صحتها.

نفترض في ميكانيكا الكم التقليدية أن الاحتمال الكمي يظهر نتيجة عملية القياس. لكن ماذا لو لم نقم بهذا؟ ماذا لو رفضنا التفسير التقليدي لقاعدة بورن، أو عثرنا على تفسيرٍ آخر أعمق لعشوائية العالم الكمي المتأصلة فيه بشكلٍ واضحٍ والتي لا يمكن تجنُّبها؟

دعنا نكون واضحين. إن حساب احتمالية الحصول على نتيجة محددة للقياس من مربع الدالة الموجية الكلية راسخٌ بصورة عميقة في الطريقة التي يستخدم بها الفيزيائيون ميكانيكا الكمِّ، ولا يطرح أحدٌ أن هذا يجب أن يتوقف. إن ما نطرحه بدلًا من ذلك ألا يُنظَر إلى قاعدة بورن ببساطة على أنها أداة لإجراء الحسابات يجب افتراضها بسبب الطريقة التي تتفاعل بها ميكانيكا الكم مع الجهاز الكلاسيكي، بل أن ينظر إليها كنتيجة لا مناص منها لفيزياء الكم التي تقبع من ورائها، أو للطريقة التي ندرك بها نحن البشر هذه الفيزياء. تعني أي طريقة من الطريقتين تغييرًا فيما نعتقده عن الاحتمال الكمي.

سوف نبدأ بإلقاء نظرة على البديل الأول.

رأينا أن الفيلسوف كارل بوبر يتفق مع بعض التعاليم الواقعية لأينشتاين وشرودنجر، ومن الواضح من كتاباته عن ميكانيكا الكم أنه يتخذ موقفًا معارضًا بشكلٍ مباشر لتفسير كوبنهاجن، وخصوصًا نسخة هايزنبرج الوضعية. بحسب بوبر، فإن كل الاضطراب المتعلِّق بالمفارقات الكمية ناتجٌ عن الفهم الخاطئ لطبيعة ودور الاحتمال.



شكل رقم ١١: لوح دبابيس بوبر.

استخدم بوبر القياس بصورة واسعة كي يشرح ما يقصده. يُظهِر شكل رقم ١١ مصفوفة دبابيس معدنية مغروسة في لوح خشبي، يحيط به صندوق، له جانب شفاف، وعلى ذلك تمكننا مشاهدة ما يحدث عندما تسقط كرة زجاجية صغيرة من الأعلى إلى داخل الشبكة، كما هو موضح. اختيرت الكرة بحيث يوافق حجمها تمامًا المسافة بين الدبابيس المتجاورة. عندما تصطدم الكرة الزجاجية بدبوس، قد تقفز إما إلى اليسار وإما إلى اليمين. يحدد المسار الذي تتبعه الكرة تسلسل القفزات العشوائية إلى اليسار وإلى اليمين عندما تصطدم بالدبابيس

المتتالية. نجري القياس ونحدِّد الموضع في قعر الشبكة حيث تستقر الكرة الزجاجية.

تسمح لنا القياسات المتكررة التي نجريها باستخدام كرة واحدة (أو «حزمة» من الكرات المتماثلة) بتحديد المعدلات التي تستقر بها الكرات المنفردة في قنوات محددة عند القعر. وعندما نجري المزيد والمزيد من القياسات، تتلاقى هذه المعدلات في نمطٍ ثابتٍ، يمكننا تفسيره في ضوء الاحتمالات الإحصائية. إذا دخلت الكرات المتتابعة الشبكة من النقطة نفسها دائمًا وإذا كانت الدبابيس متماثلة، إذن سوف نتوقع توزيعًا منتظمًا للاحتمالات، تبلغ أقصاها حول المركز، وتقل تجاه الطرفين الأيسر والأيمن. يعكس شكل هذا التوزيع ببساطة حقيقة أن احتمالية تتابُعٍ فيه عدد القفزات إلى اليسار مكافئًا لعدد القفزات إلى اليمين أكبر من احتمالية الحصول على تتابعٍ تغلب عليه القفزات إلى اليسار أو إلى اليمين.

نستنتج من هذا أن احتمالية ظهور كرة منفردة في أي من القنوات عند القعر (ولنقل E) تعتمد على احتمالية كل قفزة إلى اليسار أو اليمين في التتابع. يظهر الشكل ١١ التتابع يسار - يسار - يمين - يسار - يمين - يمين، وهو ما يضع الكرة في القناة E. لذلك تتحدد احتمالية نتيجة قياس معين عن طريق سلسلة الاحتمالات في كل خطوة في تتابع الأحداث. إذا أطلقنا على تتابع أحداث مثل هذا «تاريخًا»، إذن نلاحظ وجود أكثر من تاريخ واحد تستقر فيه الكرة في القناة E. ينجح التتابعان يمين - يسار - يسار - يمين - يسار - يمين والتتابع يمين - يمين - يمين - يسار -

يسار - يسار كذلك في القيام بالأمر بالدرجة نفسها. يذهب بوبر إلى أننا نغير نزعة النظام لتوليد توزيع معين للاحتمالات عن طريق إمالة اللوح ببساطة بزاوية أو نزع أحد الدبابيس، كتب[1]:

يغيِّر (نزع دبوس واحد) في احتمالات كل كرة منفردة، سواء اقتربت الكرة من المكان الذي نزعنا منه الدبوس أو لم تفعل.

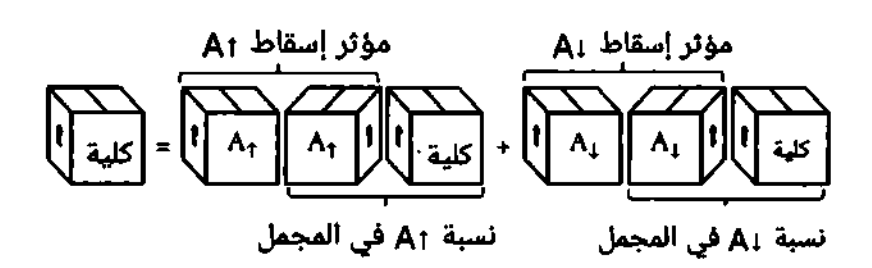
يطرح ذلك فكرة. في ميكانيكا الكم التقليدية، نُدخِل العشوائية الكمية في لحظة التفاعل أو القياس. ماذا لو كان العالم الكمي عالَمًا احتماليًّا في الأصل طوال الوقت؟ ماذا لو كانت احتمالية نتيجة قياس معين تعكس سلسلة احتماليات الأحداث في كل التواريخ التي تطرحها، مثلما هو الحال في لوح دبابيس بوبر؟

من الأسهل قليلًا التفكير في هذا في سياق مثال كمي أوضح. لذلك دعنا نعود مرة أخرى إلى نظامنا الكمي المفضَّل (الجسيم A)، مُعدّ في تراكب كمي للحالتين ↑ و↓. نُوَصِّل جهاز القياس الخاص بنا بالعداد ذي المؤشر، الذي يتحرك إلى اليسار، عند قياس A لنجدها في حالة ↑ ($A_{\uparrow}$)، ويتحرك إلى اليمين، عند قياس A لنجدها في حالة ↓ ($A_{\downarrow}$).

فيما يلي، لن نركز على الدالة الموجية في حد ذاتها بل على البناء نفسه القائم على الدالة الموجية - يمكن تمثيل ذلك (على نحو أولي) في هذا الشكل التوضيحي:

---

(1) Karl R. Popper, Quantum Theory and the Schism in Physics (Unwin Hyman, London, 1982), p. 72.



استعملت في هذه الصياغة ما يُطلَق عليها «مؤثرات الإسقاط» projection operators المشتقة من الدالتين الموجيتين ل $A_\uparrow$ و$A_\downarrow$ على الدالة الموجية الكلية. فكِّر في هذه المؤثرات على أنها أدوات رياضية تسمح لنا «بتخطيط» الدالة الموجية الكلية على «الفضاء» المُعرَّف بواسطة دالتي الأساس $A_\uparrow$ و$A_\downarrow$ [١]. يمكنك تشبيه هذه العملية بإسقاط تضاريس سطح الأرض (الكروي تقريبًا) على خريطة مسطَّحة مستطيلة، إذا كان ذلك يساعد على الفهم. إن إسقاط مركاتور هو المألوف لنا كثيرًا إلَّا أنَّ مزايا الصورة ثنائية الأبعاد تأتي على حساب الافتقار إلى الدقة كلما اقتربنا من القطبين، إذ تظهر جرينلاند وأنتاركتيكا أكبر مما عليه الحال بالفعل، وذلك على سبيل المثال.

يحدث التالي في هذا الإسقاط الميكانيكي الكمي، تجتمع «مقدمة نهاية» كل مؤثر إسقاط بالدالة الموجية الكلية، ما يسفر عن عددٍ، يتعلَّق ببساطة بنسبة تلك الدالة في المجمل. أما «نهاية مؤخرة» كل مؤثر إسقاط فهو الدالة الموجية نفسها. لذلك فإننا ننتهي إلى مجموع بسيط. نحصل

(١) «الفضاء» في هذه المسألة هو فضاءٌ رياضي مجرد، يُطلَق عليه فضاء هيلبرت، على اسم ديفيد هيلبرت.

على الدالة الموجية الكلية عن طريق جمع حاصل ضرب نسبة $A_\uparrow$ في الدالة الموجية ل $A_\uparrow$ وحاصل ضرب نسبة $A_\downarrow$ في الدالة الموجية ل $A_\downarrow$، نفترض حتى الآن في طرحنا أن هاتين النسبتين متساويتان، وسوف نستمر في ذلك.

أعرف أن هذا يبدو كتعقيدٍ غير ضروري، إلا أن مؤثرات الإسقاط تأخذنا خطوة أقرب إلى الخاصيتين الفعليتين (↑ و↓) للنظام الكمي، ومن الممكن الذهاب إلى أن لهما مغزى أكبر من الدوال الموجية نفسها.

كيف ينبغي لنا أن نفكر في خواص النظام (الممثلة عن طريق مؤثرات الإسقاط) بينما يتطور في الزمن خلال عملية القياس؟ ومن أجل تبسيط هذا بصورة أكبر سوف نهتم بثلاث لحظات أساسية فقط: النظام الكلي (النظام الكمي بالإضافة إلى نظام القياس) في لحظة ابتدائية ما عقب الإعداد مباشرة (سوف نشير إليها على أنها الوقت t_0)، والنظام عند وقتٍ ما لاحق قبل القيام بالقياس مباشرة (t_1) والنظام بعد القياس (t_2)، نحصل حينئذٍ على نتيجة القياس من تتابع أو «تاريخ» الأحداث الكمية.

وها هو الأمر المثير، إن التاريخ الذي نربطه بميكانيكا الكم التقليدية ليس التاريخ الوحيد المتفِق مع ما نراه في المعمل، مثلما توجد تواريخ مختلفة تترك الكرة الزجاجية في القناة E في لوح دبابيس بوبر.

كان الفيزيائي روبرت جريفيثس هو أول من طوَّر تفسير التواريخ المتسقة في عام ١٩٨٤. تنتظم هذه التواريخ في «عائلات» أو ما فضَّل جريفيثس أن يُطلِق عليه «أُطُر عملٍ». يمكننا ابتكار ثلاثة أطر عملٍ على الأقل بالنسبة إلى عملية القياس التي نُعنى بها هنا: في إطار العمل

#١: نبدأ في الوقت t_0 بتراكب كمي ابتدائي للحالتين $A_\uparrow$ و$A_\downarrow$، وجهاز القياس (الذي نستمر في تصويره على هيئة عدَّادٍ من نوعٍ ما) في حالة «متعادلة» أو حالة ما قبل القياس. نفترض أنه نتيجة لعملية ما تلقائية يتطور النظام عند الوقت t_1 إلى $A_\uparrow$ أو $A_\downarrow$، كل حالة منهما متشابكة مع العدَّاد في حالته المتعادلة. يحدث القياس بعد ذلك عند الوقت t_2، وحينها يتحرك مؤشر العدَّاد إما إلى اليسار وإما إلى اليمين، بحسب الحالة الموجودة بالفعل.

الوقت	إطار العمل #١	إطار العمل #٢	إطار العمل #٣
t_0	($A_\uparrow$ و $A_\downarrow$)	($A_\uparrow$ و $A_\downarrow$)	($A_\uparrow$ و $A_\downarrow$)
t_1	$A_\uparrow$ أو $A_\downarrow$	$A_\uparrow$ و $A_\downarrow$	$A_\uparrow$ و $A_\downarrow$
t_2	$A_\uparrow$ أو $A_\downarrow$	$A_\uparrow$ أو $A_\downarrow$	$A_\uparrow$ و $A_\downarrow$

إطار العمل #٢ هو الأقرب إلى الطريقة التي تشجعنا الصُّوَريَّة الكمية التقليدية على التفكير في الأمر من خلالها. يتشابك التراكب الكمي الابتدائي في هذه العائلة من التواريخ مع العدَّاد، ولا يحدث الانفصال إلى $A_\uparrow$ ومؤشر إلى اليسار و$A_\downarrow$ ومؤشر إلى اليمين إلا عند t_2، وهي النقطة التي نتصور أو نفترض حدوث «الانهيار» عندها. لا يوجد مثل هذا الانهيار في إطار العمل #٣، الذي يكون فيه $A_\uparrow$ ومؤشر إلى اليسار متشابك مع $A_\downarrow$ ومؤشر إلى اليمين عند t_2، ما يؤدي إلى تراكب كمي ماكروسكوبي (على مستوى الأجسام الكبيرة)، وهو ما يُعرَف لأسبابٍ واضحة باسم حالة قطة شرودنجر.

هذه الأطر المختلفة متسقة في جوهرها إلا أنها متنافية (يمتنع حدوثها معًا). يمكننا عزو احتمالات إلى تواريخ مختلفة داخل كل إطار عمل مستخدمين قاعدة بورن، وهذا ما يجعلها متسقة. إلا أنه -كما يشرح جريفيثس-: «غالبًا ما يحدث في ميكانيكا الكم أن توجد أطر عمل متنوعة غير متوافقة، وقد تُوَظَّف لمناقشة موقف محدد، ويمكن للفيزيائيين استعمال أي واحد منها أو التدبُّر في العديد منها»[1]. يوفِّر كلٌّ منها وصفًا صالحًا للأحداث، إلا أنها متمايزة ولا يمكن الجمع بينها.

فجأة، يجعل هذا التفسير أي جدل حول الحدِّ بين العالم الكمي والعالم الكلاسيكي -انقسام بيل الخادع- أمرًا غير ذي صلة على الإطلاق. إنَّ كل أطر العمل صالحة بالقدر نفسه، ويمكن للفيزيائيين التقاط واختيار إطار العمل الأنسب للمشكلة التي يهتمون بها. من الصعب بالتأكيد بالنسبة إلينا مقاومة إغراء التساؤل: لكن ما إطار العمل «الصحيح»؟ لا يوجد إطار عملٍ صحيحٌ في تفسير التواريخ المتسقة، مثلما لا وجود لما يُسمَّى بالدالة الموجية «الصحيحة»، ولا وجود لأساسٍ «مفضَّل».

مع ذلك ألَّا يفرض التغيُّر في الحالة الفيزيائية الذي تطرحه الأحداث الواقعة بين t_0 وt_1 في إطار العمل #١ وبين t_1 وt_2 في إطار العمل #٢ انهيارًا من نوعٍ ما؟ لا، لا يفرض ذلك[2]:

ثمة طريقة أخرى لاجتناب هذه الصعوبات، عن طريق التفكير في انهيار الدالة الموجية بوصفه عملية رياضية لحساب الارتباطات

(١) Robert Griffiths, personal communication, 5 November 2018.

(٢) Robert B. Griffiths, Consistent Quantum Theory (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002), p. 214.

الإحصائية وليست تأثيرًا فيزيائيًّا يتولَّد عن جهاز القياس... وعلى ذلك «فالانهيار» هو شيء يحدث في دفتر المُنَظِّر، لا في معمل التجريبي.

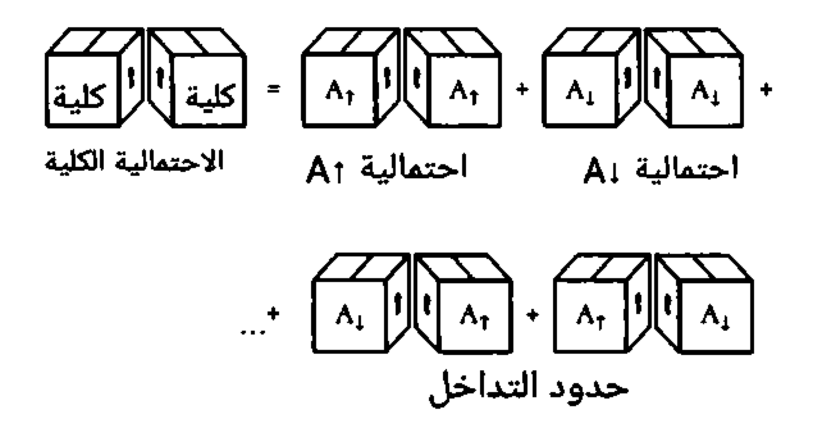
صرنا نعرف الآن من خلال نقاشنا السابق عن التفسيرات العلائقية وتفسيرات نظرية المعلومات ما الذي يستلزمه هذا. إن الدوال الموجية (وبالتالي مؤثرات الإسقاط المشتقة منها) ليست واقعية، وفقًا لتفسير التواريخ المتسقة. يعالج جريفيثس الدالة الموجية باعتبارها بناءً رياضيًّا محضًا، احتمالًا مسبقًا، يمكننا من حساب الاحتمالات الكمية داخل كل إطار عملٍ. نستنتج من هذا أن تفسير التواريخ المتسقة تفسيرٌ لا واقعي. يتضمن رفضًا للفرضية #٣.

يكون تفسير التواريخ المتسقة في غاية الفعالية عندما نهتم بأنواعٍ مختلفة من المسائل. ارجع إلى التفكير في تجربة الشقَّيْن وتداخل الإلكترونات. والآن افرض أننا استخدمنا مصدرًا ضعيفًا لفوتونات ذات طاقة منخفضة في محاولة لاستكشاف من أي ثقبٍ مرَّ كلُّ إلكترون. لا ترمي الفوتونات بالإلكترونات خارج المسار، لكنها إذا تشتَّتت عند ثقبٍ ما أو الآخر، فهذا يشير إلى الطريق الذي سلكه الإلكترون. نبدأ إجراء التجربة. ومع تراكم البقع اللامعة على الشاشة الفسفورية، نتوقع تكوُّن نمط تداخل (شكل رقم ٤). وبهذه الطريقة كشفنا عن سلوك الإلكترون الشبيه بسلوك الجسيمات «أي طريق سلك؟» وسلوكه الشبيه بسلوك الموجات «التداخل»، كشفنا عن السلوكين معًا في الوقت نفسه.

لا تتسرَّع، يبدو من الواضح في تفسير التواريخ المتسقة أن سلوك طريق معين والتداخل ينتميان إلى أطر مختلفة وغير متوافقة. إذا فكرنا في هذه البدائل على أنها تتضمن «تواريخ جسيمية» (المسارات التي

اتُّخِذَت) أو «تواريخ موجية» (تأثيرات التداخل)، يصبح تفسير التواريخ المتسقة بالضرورة إعادة صياغة لمبدأ التكامل الخاص ببور، وقد صيغ بلغة الاحتمالات. لا يوجد ببساطة إطار عملٍ يمكن أن تظهر فيه الخواص الجسيمية والخواص الموجية كلاهما معًا في الوقت نفسه. من هذا المنظور، ليس الهدف من التواريخ المتسقة أن تكون بديلًا، بل أن تكون صياغة واضحة ومتسقة تمامًا لميكانيكا الكم الأساسية، «فعلتها كوبنهاجن على نحوٍ صحيحٍ»[1].

إلا أن ثمَّة مشكلة. إذا كنَّا نعتمد على قاعدة بورن لتحديد احتمالات التواريخ المختلفة داخل كل إطار عمل، إذن يجب أن نعترف بحقيقة لا مفرَّ منها تتعلَّق بالجبر الناتج. حتى تتفاعل الدالة الموجية مع جهاز القياس، قد يحتوي مربع الدالة الموجية الكلية على «حدودٍ مختلطة» cross terms أو «حدود تداخل» interference terms :



---

(1) Robert B. Griffiths, 'The Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics', Stanford Encyclopedia of Philosophy, Spring 2017, p. 3.
(هذه العبارة تُستخدم للترويج لتفسير التواريخ المتسقة) (المترجم).

وكما يوحي الاسم، حدود التداخل مسؤولة عن التداخل، هي من ذلك النوع بالضبط الذي يؤدي إلى ظهور الأهداب المضيئة والمعتمة في تجربة الشقَّين. لا يستلزم انهيار الدالة الموجية في ميكانيكا الكم التقليدية اختيارًا عشوائيًّا فقط بين النتيجتين $A_{\uparrow}$ و$A_{\downarrow}$، بل اختفاء لحدود التداخل كذلك.

يمكننا رصد تأثيرات التداخل باستخدام الضوء أو الإلكترونات أو الجزيئات الكبيرة أو الحلقات فائقة التوصيل (كما سوف نرى في الفصل الثامن). من نافلة القول إننا لا نرصد تداخلًا من أي نوع في الأشياء الكبيرة التي في حجم المعمل، على شاكلة مؤشرات العداد أو القطط، لذلك نحن في حاجة إلى أن نجد آلية لتفسير هذا.

افترض بور وجود حدٍّ بين العالَم الكمي والعالَم الكلاسيكي، من دون أن يوضح أبدًا أين قد يكون أو كيف قد يعمل. إلا أننا نعرف بالطبع أن أي جهاز قياس كلاسيكي يتكوَّن بالتأكيد من كياناتٍ كمية مثل الذرات والجزيئات. لذلك نتوقَّع أن التفاعل في المراحل الأولى بين النظام الكمي وأداة الرصد الكلاسيكية من المرجح أن يكون ذا طبيعة كمية. يمكننا أن نتوقَّع بعد ذلك تزايد العدد الهائل من الحالات الكمية المُتَضَمَّنة بينما يتضخم التفاعل الابتدائي ويتحوَّل إلى إشارة يمكن للبشري الذي يُجري التجربة إدراكها – على غرار نقطة لامعة على شاشة فسفورية أو تغير في اتجاه مؤشر العداد.

في المثال الذي ناقشناه سابقًا، يطلق وجود الجسيم A في حالة ↑ في أداة الرصد سلسلة من تفاعلاتٍ أكثر تعقيدًا، ويحكم الاحتمال كل

خطوة في السلسلة. وعلى الرغم من أن كل تفاعل يكون انعكاسيًّا من حيث المبدأ عندما يعامَل منفردًا، فإنه سرعان ما تغلب «الضوضاء» والتعقد في المحيط على العملية، ولذلك تبدو غير انعكاسية. مثلما لا تجتمع معًا أجزاء زجاجة عصير مهشَّمة على الأرض تلقائيًّا، بغض النظر عن الفترة التي نقضيها في الانتظار، رغم عدم وجود شيء في نظرية الميكانيكا الإحصائية الكلاسيكية يقول باستحالة حدوث ذلك.

يُطلَق على هذه الإزاحة لتأثيرات التداخل الكمي المصاحبة لتحول عملية القياس نحو الازدياد في الحجم والتعقد «فك الارتباط». في عام ١٩٩١ مدَّ موري جيلمان وجيمس هارتل شروط اتساق تفسير التواريخ المتسقة خصيصًا من أجل تفسير كبح فك الارتباط لحدود التداخل. يُشار حاليًّا في المعتاد إلى التفسير الناتج عن ذلك باسم «تواريخ فك الارتباط».

سوف نلتقي بفكِّ الارتباط مرة أخرى. لكنني أود إضافة ملحوظة، إن فكَّ الارتباط آلية لترجمة الظواهر على النطاق الكمي الميكروسكوبي (الصغير) إلى الأشياء التي نرصدها على النطاق الكلاسيكي الماكروسكوبي (الكبير)، وقد صُمِّم لإزالة الغرابة الكمية العجيبة على طول الطريق. انتشر فكُّ الارتباط في عددٍ من التفسيرات المختلفة كما سوف نرى. في هذه اللحظة تحديدًا، يُستخدم فك الارتباط بوصفه تقنية رياضية عامة وتجريدية إلى حدٍّ ما من أجل «تطهير» الاحتمالات التي تنشأ عن حدود التداخل. يتسق هذا تمامًا مع المنظور الذاهب إلى أن الدالة الموجية احتمالٌ مسبق، وعلى ذلك ليست واقعية فيزيائيًّا. ثمة

تفسيراتٌ أخرى تتخذ منظورًا أكثر واقعية بالنسبة إلى الدالة الموجية تستغل فك الارتباط بوصفه عملية فيزيائية واقعية.

نقطة واحدة أخيرة. يخلصنا فك الارتباط من حدود التداخل، إلا أنه لا يفرض اختيارًا لنتيجة القياس (سواء $A_{\uparrow}$ أو $A_{\downarrow}$) – إذ لا تزال متروكة للصدفة العشوائية، لم يكن أينشتاين ليرضى عن ذلك.

كان حافز جيلمان وهارتل للبحث عن بديلٍ لتفسير كوبنهاجن أنه يربط عملية القياس بدلالة خاصة. لم يكن هذا في ذلك الوقت على وفاقٍ مع نظريات الكوزمولوجيا (علوم الكون) الكمية الناشئة –التي تُطبَّق فيها ميكانيكا الكم على الكون كله– إذ إنه لا يوجد نظريًّا شيء «خارج» الكون كي يجري القياسات عليه. تحل تواريخ فك الارتباط هذه المشكلة عن طريق جعل دلالة القياس لا تزيد على دلالة أي نوعٍ آخر من الأحداث الكمية.

نما الاهتمام بالتفسير، معزَّزًا بمجموعة دولية من الفيزيائيين، مجموعة صغيرة العدد لكنها مؤثِّرة، تضم جريفيثس ورولاند أومنيس وجيلمان وهارتل.

إلا أن التوجُّس نما كذلك.

في عام ١٩٩٦، أوضح المُنَظِّران فاي دوكر وأدريان كنت أن معضلات خطيرة تنشأ عندما تبلغ أُطر العمل النطاقات الكلاسيكية. على الرغم من أن تاريخ العالم الذي نألفه قد يبدو تاريخًا متسقًا حقًّا، فإنه ليس

التاريخ الوحيد الذي يقبله التفسير[1]، يوجد عددٌ لا نهائي من التواريخ الأخرى كذلك. بما أن كل الأحداث داخل كل تاريخٍ ذات طبيعة احتمالية، إذن تتضمن بعض هذه التواريخ تتابُعًا مألوفًا للأحداث إلا أنه يتغيَّر بعد ذلك بغتة إلى تتابُعٍ غير مألوفٍ بتاتًا. ثمة تواريخ كلاسيكية الآن، لكنها كانت في الماضي تراكبات لتواريخ كلاسيكية أخرى، ما يطرح أننا لا نملك أساسًا لاستنتاج أن اكتشاف حفريات الديناصورات اليوم يعني أن الديناصورات تجوَّلت في الأرض منذ مائة مليون عامٍ.

بما أنه لا يوجد إطارٌ «صحيحٌ» يظهر بشكلٍ فريدٍ نتيجة عمل قانون ما للطبيعة، يعتبر التفسير كل الأطر المحتملة صالحة بالقدر نفسه، ومن ثم يعتمد الاختيار على أنواع الأسئلة التي نسألها. يبدو أن هذا يتركنا مع اعتمادٍ كبيرٍ على السياق، تبدو قدرتنا على تعقل الفيزياء فيه معتمدة على قدرتنا على طرح الأسئلة «الصحيحة». إننا مجهَّزون بالإجابات[2] مثل الكمبيوتر الضخم المُسمَّى «التفكير العميق» في رواية دوجلاس آدامز «دليل المسافر إلى الكون»، إذ أُنشئ كي يجيب عن الأسئلة الكبرى عن «الحياة والكون وكل شيء»، إلا أننا قد نأمل فقط في فهم الأمر إذا كنَّا أكثر تحديدًا بالنسبة إلى السؤال.

---

(١) Fay Dowker and Adrian Kent, 'On the Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics', Journal of Statistical Physics, 82 (1996), 1575–1646.

انظر أيضًا: arXiv:gr-qc/9412067v2, 25 January 1996.

(٢) أُنشئ الكمبيوتر في الرواية كي يجيب عن الأسئلة الكبرى، وقرَّر أنه في حاجة إلى ٧,٥ مليون سنة كي يجيب، في النهاية قال إن الإجابة هي «٤٢»، وأشار الكمبيوتر إلى أن المشكلة كانت في أن الأسئلة لم تحدد، وساعدهم في بناء كمبيوتر أضخم هو كوكب الأرض كي يعثر لهم على السؤال. (المترجم).

اعترف جريفيثس بأن توجُّسات دوكر وكنت لها ما يسوغها، إلا أنه استنتج أن هذا هو الثمن الذي يجب دفعه. إن تفسير تواريخ فك الارتباط[1] مخالفٌ للإيمان أو البداهة الراسخين بعمقٍ، اللذين يتشاركهما الفلاسفة والفيزيائيون ورجل الشارع مضربَ الأمثال، إذ إنه عند أي نقطة في الزمن توجد حالة واحدة «صحيحة» للكون وهي حالة واحدة فقط، ويجب أن تكون كل عبارة صحيحة عن العالم متسقة معها. يجب هجر (هذه البداهة) إذا كان تفسير التواريخ لنظرية الكم على المسار السليم.

في مثل تلك المواقف، أجد أن التراجع خطوة يفيد أحيانًا. ربما سوف أجهز فنجان شاي آخر، أتوقف عن التفكير في ميكانيكا الكم لبعض الوقت، وآمل أن ينصرف الصداع العنيد.

في لحظات التأمُّل الهادئ تلك، يشرد ذهني (كما يفعل في الغالب) ويفكر في حالتي المالية الشخصية. حسنًا، إنني أعتبر نفسي رجلًا عقلانيًّا. عندما يواجهني خيارٌ بين فعلين، أميل إلى اختيار الفعل الذي يُعَظِّم من منفعة ما متوقعة، مثل ثروتي الشخصية. يبدو هذا مباشرًا، لكنَّ العالم مكانٌ معقدٌ وغير متوقع في الغالب، خصوصًا في عصر ترامب والبريكزيت. أعرف منذ زمنٍ أن شراء تذاكر اليانصيب الوطني الأسبوعية لا تعتبر خطة تقاعد جيدة، إلا أنه بعيدًا عن مثل هذه الأمور المعروفة بوضوحٍ، كيف يمكن لأيٍّ منَّا أن يعرف أي فعل يتخذ؟ هل ينبغي لي أن أودع أموالي في حسابي البنكي أم أستثمر في السندات الحكومية أم في سوق الأسهم؟

---

(١) Griffiths, 'The Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics', p. 46.

تتمثَّل ميولنا العقلانية في وضع احتمال على كل فعل واختيار الفعل الذي يحمل احتمالًا أكبر لجلب المنفعة المتوقعة. لا نحسب بالضرورة هذه الاحتمالات: قد ننظر إلى معدلات الفائدة البنكية وندرس سوق الأسهم ونحاول صياغة منظور عقلاني، إلا أنه معاييري. أو ربما نتجه نحو بعض الآراء الذاتية بشكلٍ كبيرٍ حول الاختيارات المختلفة، آخذين في الاعتبار شعورنا وشهيتنا نحو المخاطرة المالية. وبالطبع، قد نلقي بحِمْل مسؤولية القيام بهذه الاختيارات على مستشار مالي، إذا كنَّا نستطيع دفع نفقاته، إلا أننا ما زلنا نرغب في سماع ما هو عقلاني بخصوص هذه الاختيارات قبل الشروع في أحدها.

يعود الفضل في مفهوم الاحتمال بوصفه مقياسًا لدرجة الذاتية في اعتقادنا أو تشككنا إلى عالِم الإحصاء والفيلسوف ووزير المشيخية[1] من القرن الثامن عشر توماس بايز، منح بيير سيمون لابلاس لمقاربة بايز صياغتها الرياضية الحديثة في عام ١٨١٢.

افرض أنكَ صغتَ فرضية تذهب إلى أن عبارة ما قد تكون صحيحة أو صالحة، في نظرية الاحتمال البايزي، نعزو إلى هذه الفرضية احتمالًا يعبِّر عن مقدار صلاحها، كمقياسٍ لدرجة اعتقادك فيها. يُطلَق عليه الاحتمال القَبلي prior probability. والآن انظر إليها مرة أخرى في ضوء دليلٍ حقيقي، يطلق على احتمال صلاح الفرضية في ضوء الدليل الاحتمال البَعدي posterior probability.

(١) المشيخية أو البريسبيتارية، مجموعة كنائس تتبع التعاليم البروتستانتية. (المترجم).

يواجهكَ الآن سؤالٌ بسيطٌ. هل الاحتمال البَعدي أكبر أم أصغر من الاحتمال القَبلي؟ بمعنى آخر، هل يؤكد الدليل فرضيتك أو على الأقل يدعمها، هل يدحضها أو يقوضها؟ أم أنه محايدٌ؟ تُستخدم نظرية الاحتمال البايزي بشكلٍ واسعٍ في العلم، خاصة في فلسفة العلم كوسيلة للتفكير في كيفية استخدامنا للدليل التجريبي من أجل تأكيد أو دحض النظريات العلمية.

إلا أننا إذا فكرنا في هذا لبعض الوقت، سوف نستنتج أن هذه الاحتمالات ذاتية إلى حدٍّ ما بالفعل. قد أصل إلى الاعتقاد في شيء، لكنك قد تنظر إلى الدليل نفسه وتصل إلى الاعتقاد في شيء مختلف تمامًا. من الذي يحدد أي منّا على صوابٍ؟ نستطيع المضي في حياتنا اليومية مع هذا النوع من الذاتية، لكن من المؤكد أنه لا مكان لهذا في نظريات الفيزياء القائمة على حقائق موضوعية بخصوص واقع موضوعي (الفرضية #١)[1] قد يمثل هذا فرصة سانحة للإشارة إلى نسخة مُطوَّلة من اقتباسنا عن هايزنبرج[2]:

يأتي وضعنا الفعلي في العمل البحثي في الفيزياء الذرية على هذا النحو في المعتاد: نرغب في فهم ظاهرة معينة، نرغب في التعرف على الطريقة التي تتبع بها هذه الظاهرة القوانين العامة للطبيعة. لذلك فإن جانب المادة أو الإشعاع الذي يشارك في الظاهرة هو «الموضوع» الطبيعي في المعالجة النظرية، ويجب تفريقه من هذه الناحية عن

---

(١) هذه الفرضيات الواقعية ملخصة ومتاحة في الملحق، إذا كنت بحاجة إلى الرجوع لها.

(٢) Werner Heisenberg, Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science (Penguin, London, 1989; first published 1958), p. 46.

الأدوات المستخدمة في دراسة الظاهرة. يجزم هذا من جديد بعنصر ذاتي في وصف الأحداث الذرية، لأن جهاز القياس صنعه الراصد، وعلينا أن نتذكر دائمًا أن ما نرصده، ليس الطبيعة في نفسها لكنها الطبيعة المتكشَفة لمناهجنا في البحث.

عندما يمضي العلماء في عملهم -يرصدون ويجربون وينظِّرون ويتنبؤون ويختبرون وهكذا- يميلون إلى القيام بذلك وفق عقلية ومسلك محددين ثابتين. يميل العلماء إلى افتراض أنه لا شيء بنا مميز بالفعل. لا نتمتع بامتيازٍ فريدٍ عندما نرصد الكون الذي نسكنه. لسنا في مركز كل شيء. إن هذا هو «المبدأ الكوبرنيكي»: يناضل العلم من أجل صياغة، يكون وجودنا فيها نتيجة طبيعية للواقع بدلًا من أن يكون السبب فيه.

تَذَكَّر أن النتيجة الأهم لنظريتيْ أينشتاين النسبية الخاصة والعامة تتمثَّل في إرجاع الراصد إلى داخل الواقع المرصود. لذلك، ألا ينبغي لنا على الأقل القبول بحاجتنا إلى إرجاع التجربة إلى داخل الواقع الكمي الذي تُجرى عليه التجربة؟ لسنا بحاجة إلى المضي بعيدًا كي نطرح رابطًا سببيًّا – لسنا بحاجة إلى رفض الفرضية #١ والذهاب إلى أن القمر يتوقف عن الوجود عندما لا ينظر إليه أو يفكر فيه أحدٌ. ربما نحتاج إلى أن نقبل فقط بأن الصياغة العلمية ليست مكتملة بالفعل ما لم نضع أنفسنا بحزمٍ في القلب منها. في عام ٢٠٠٢ طرح كارلتون كافيس وكريستوفر فيوكس وروديجر شاك هذا تمامًا. بدلًا من إنكار العنصر الذاتي في ميكانيكا الكم، اعتنقوه. ذهبوا إلى أن الاحتمالات الكمية المحسوبة باستخدام قاعدة بورن ليست احتمالات موضوعية تتعلَّق ميكانيكيًّا بالطبيعة الكمية

من خلفها. إنها احتمالات بايزية تعكس درجة الاعتقاد الشخصية الذاتية للفرد الذي يجري التجربة، تتعلق فقط بخبرة من يجري التجربة بالفيزياء. قد تتجه بداهتك الأولى إلى رفض هذه الفكرة الجامحة. بالتأكيد يوجد اختلافٌ عريضٌ بين اعتقاداتي الذاتية بخصوص سوق الأسهم وبين حقائق الفيزياء التي لا جدال فيها، أليس كذلك؟ مع ذلك فكِّر في الأمر. يحد افتقاري إلى الخبرة والمعرفة من قدرتي على التنبؤ بالحركات في سوق الأسهم. إذا أخذت الوقت الكافي لزيادة خبرتي وبناء معارفي وتشفير هذا في زوجين من الخوارزميات المفيدة، فثمة فرصة جيدة أمامي للقيام بتنبؤات أكثر واقعية (ولنسأل فقط وارن بافت)[1].

كيف تختلف فيزياء الكم؟ لقد أخذ الفيزيائيون الوقت الكافي خلال مئة سنة الماضية أو نحو ذلك، كي يزيدوا من خبرتهم، ويبنوا هيكلًا معرفيًّا يخص الأنظمة الكمية، ذلك الهيكل المعرفي المُشَفَّر في مجموعة المعادلات التي نُطلِق عليها ميكانيكا الكم. لماذا يعتقدون في قاعدة بورن؟ لأن هذا ما سوف يختار القيام به أي فيزيائي عقلاني، يمتلك سبيلًا إلى الخبرة بميكانيكا الكم ومعرفة بها وبخوارزمياتها. «إن القانون الفيزيائي الذي يصف الاحتمالات الكمية جوهري حقًّا، إلا أن السبب في هذا يكمن في أنه قاعدة جوهرية للاستدلال تتعلق بالاحتمالات البايزية – إنه قانون للتفكير»[2].

---

(١) أحد أشهر المستثمرين الأمريكيين في بورصة نيويورك. (المترجم).

(٢) Carlton M. Caves, Christopher A. Fuchs, and Rüdiger Schack, 'Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities', Physical Review A, 65 (2002), 022305. See also arXiv:quant-ph/0106133v2, 14 November 2001.

يُعرف هذا التفسير باسم البايزية الكمية Quantum Bayesianism ويُختصَر إلى QBism (ويُنطَق كيوبيزم «cubism»). الأمر ذاتي تمامًا. يرى معتنقو البايزية الكمية ميكانيكا الكم أنها «أداة ذهنية، تساعد مستخدميها على التفاعل مع العالَم من أجل التنبؤ بخبرتهم به والتحكُّم فيها وفهمها»(١). تحوَّل ميرمين إلى الكيوبيزمية على الرغم من نصائح أساتذته، وذلك عقب مرافقته لفيوكس وشاك لمدة ستة أسابيع في معهد ستيلينبوش للدراسات المتقدمة بجنوب إفريقيا في عام ٢٠١٢، حيث «بدأ يفهم أخيرًا ما كانا يحاولان إخباره به طوال عشرة أعوام الماضية»(٢).

تقدمت المقاربة إلى ما وراء قاعدة بورن نحو الحالات الكمية نفسها، والدوال الموجية التي نستخدمها من أجل تمثيلها. تضع معادلة شرودنجر ببساطة قيودًا على الطريقة التي قد يختار بها أي فيزيائي عقلاني وصف خبرته، حتى يحين الوقت الذي يصبح فيه على دراية بنتيجة القياس.

ولا مشكلة في هذا، ذهب روفيللي للسبب نفسه إلى أن معرفته بالصين تتغيَّر لحظيًّا عندما يختار قراءة مقال عن الصين في الصحيفة.

---

(١) Richard Healey, 'Quantum-Bayesian and Pragmatist Views of Quantum Theory', Stanford Encylopedia of Philosophy, Spring 2017, p. 9.

(٢) N. David Mermin, 'Annotated Interview with a QBist in the Making', arXiv:quant-ph/1301.6551.v1, 28 January 2013.

مع ذلك فَسَّر ميرمين «الكيوبيزم» بشكلٍ مختلفٍ قليلًا، مفضلًا الاعتراف بفضل برونو دي فينيتي -أحد رواد الاحتمال الذاتي- بدلًا من باير، وعلى ذلك يعود حرف B إلى برونو.

عندما يتحرك مؤشر العداد إلى اليسار، تختار أليس العقلانية وصف هذه الخبرة بنتيجة القياس من خلال الحالة الكمية +A. تعبر عن درجة إيمانها بهذه النتيجة عن طريق تدوين «+» في دفتر المعمل الخاص بها. أما بوب العقلاني الذي يحتجزه المشرف على البحث في الممرِّ بالخارج فيختار وصف خبراته من خلال التراكب الكمي الماكروسكوبي متضمنًا النظام الكمي وجهاز القياس والعداد وأليس ودفترها. عندما يدخل بوب أخيرًا إلى المعمل، تريه أليس دفترها وتتغيَّر خبرة بوب ومعتقداته. إن هذا هو «القياس» الخاص ببوب، لا يتضمن أي أنظمة كمية، أو أجهزة رصدٍ، أو عدادات، يجري بوب قياسه عن طريق النظر إلى دفتر أليس فقط، أو عن طريق طرح سؤال عليها ببساطة، لم يكن بوب موجودًا بالطبع عندما قامت أليس بقياسها، إلا أنه يثق بأليس بوضوحٍ، ودرجة إيمانه بالنتيجة لا تتزعزع.

ومرة أخرى، تتبخر كلُّ المشاكل المرتبطة بالتفسير الواقعي للدالة الموجية إذا جعلنا الأمر كله يدور حول الخبرات الذاتية. إن الاحتمالية الكمية حكمٌ شخصيٌّ على الفيزياء، لا تقول شيئًا عن الفيزياء نفسها[١]. لا يوجد انهيارٌ للدالة الموجية، وذلك لسببٍ بسيطٍ، أنه لا توجد نتائج قبل عملية القياس (مهما كان المقصود بالقياس): يستحيل أن توجد خبراتٌ قبل أن تُختبَر. لا يوجد شيء يُدعى المحلية، ولا يوجد تأثيرٌ

---

(١) ذهب شاك إلى أن «المسلمات المعقولة الخمس» يمكن اختزالها إلى أربع، عن طريق إعادة تفسير الأولى من خلال الاحتمالات البايزية وعن طريق تعديل جزءٍ من البرهان، انظر:
Rüdiger Schack, 'Quantum Theory from Four of Hardy's Axioms', Foundations of Physics, 33 (2003), 1461–8.
انظر أيضًا: **arXiv:quant-ph/ 0210017v1, 2 October 2002.**

شبحي عن بعد: «ميكانيكا الكم الكيوبيزمية محلية لأن هدفها كله تمكين أي عنصر فاعل من تنظيم درجات إيمانه بمحتويات خبرته الشخصية، لا يوجد عنصرٌ فاعلٌ يمكنه التحرك أسرع من الضوء»[1].

يُعتبر هذا تفسير «المستخدم الواحد». إذ إن الخبرات ودرجات الإيمان متفردة بالنسبة إلى كل شخص، تصبح الاحتمالات البايزية بلا معنى عند تطبيقها على أفراد متعددين في المرة نفسها. علينا مواجهة حقيقة أن الطبيعة الذاتية لخبرات الأفراد تعني أننا جميعًا نحمل في عقولنا بالضرورة نسخًا مختلفة للواقع من حولنا، إذا كان الحال على هذه الصورة، كيف يصبح علمٌ من أي نوع ممكنًا؟

هدئ من روعك. لا تزال نسخ الواقع التي نحملها في عقولنا تشكلها خبراتنا بالواقع التجريبي الخارجي المفرد. نطور ما أطلق عليه الفيلسوف جون سورل «الخلفية» نتيجة لكل خبراتنا وتعلمنا واتصالنا برفاقنا، (كنتُ قد أتيت على ذكر هذا الاصطلاح باختصار في الفصل الثاني) إنها خلفية واسعة ومتنوعة بشدة، نتفاعل مع الواقع الخارجي قُبالتها، إنها كل شيء نتعلَّمه من الخبرة ونعتبره مُسَلَّما به، إنها كل شيء اجتماعي وفيزيائي، كل شيء نجمعه بينما نواصل في حياتنا اليومية. إنها حيث نجد كل انتظام واتصالية، حيث نتوقع أن الشمس سوف تشرق في الغد، أن الأشياء سوف نجدها في المكان الذي تركناها فيه، أن العربات

---

(1) Christopher A. Fuchs, N. David Mermin, and Rüdiger Schack, 'An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics', American Journal of Physics, 82 (2014), 749–54. انظر أيضًا: arXiv:quant-ph/1311.5253v1, 20 November 2013.

لن تتحوَّل إلى أشجار، أن هذه الفاتورة التي قيمتها ٢٠ دولارًا تستحق بالفعل عشرين دولارًا، أنك عندما تقلِّب الصفحة سوف تجد الصفحة التالية ممتلئة بنصٍّ مثيرٍ في عمق، لا بصور النقانق.

نُكَوِّن جميعًا الخلفية عن طريق مراكمة مجموعة من الانطباعات الذهنية، إلا أن ثمة تماثلًا كبيرًا بين هذه الانطباعات، إذ نستقيها من مجموعة عريضة من الخبرات المشتركة (بما في ذلك خبراتنا بفيزياء الكم)، ومن هيكل معرفي مشترك، ومن أشكال من التواصل اليسير الشائع، ومن الوجدان الإنساني، إن هذا التشابه الوثيق بين هذه الخلفيات الفردية هو ما يجعل المعاملات البشرية أمرًا ممكنًا.

ثمة أمرٌ آخر شبيه لكنه غير مماثلٍ، داخل عقلي الواقع الذي تعلمتُ التفاعل من خلاله، لا يمكنكَ بلوغ هذا الواقع، لأنك لا تملك الوصول إلى عقلي. داخل عقلك الواقع الذي تعلَّمتَ التفاعل من خلاله، لا يمكنني بلوغ هذا الواقع، لأنني لا أملك الوصول إلى عقلكَ. ليس واقعي واقعك، إلا أن هذين الواقعين يملكان العديدَ من الجوانب المشتركة، على غرار معرفة أن الفاتورة التي قيمتها ٢٠ دولارًا تساوي مالًا، أو أنني إذا أجريت هذه التجربة سوف أحصل على النتيجة $A_{\uparrow}$ في ٥٠٪ من المرات. وعلى الرغم من التعقُّد المذهل لتفاعلاتنا اليومية، فإننا ندرك الواقع المنفصل لكل واحد منَّا كأنه واقعٌ واحدٌ.

من الواضح أن الكيوبيزمية ترفض الفرضية #٣، وفي هذا الخصوص هي لا واقعية دون مواربة أو خجل على مستوى التمثل، ليس لديها شيء ذو مغزى كي تقوله عن الفيزياء الواقعة فيما وراء الخبرة، مرة أخرى إضافية، لا شيء هنا كي نراه.

يسعى تفسير كوبنهاجن إلى توجيه اللوم بخصوص تعذُّر الوصول إلى العالم الكمي إلى لغتنا وأجهزتنا الكلاسيكية. يُحَوِّل تفسير روفيللي العلائقي اللوم نحو الحاجة إلى تأسيس علاقاتٍ مع الحالات الكمية إذا كان لها أن تكتسب أي دلالة فيزيائية. تفعل التفسيرات القائمة على المعلومات الشيء نفسه. يستقر اللوم في تفسير التواريخ المتسقة أو تواريخ فك الارتباط على طبيعة الأحداث الكمية الاحتمالية في جوهرها، والافتقار إلى قاعدة لتحديد الإطار «الصحيح».

إن كل الفيزياء الواقعة فيما وراء خبرتنا يتعذَّر الوصول إليها، بحسب الكيوبيزمية. ينطبق هذا النوع من الذاتية بالدرجة نفسها وبشكلٍ جيدٍ على الميكانيكا الكلاسيكية، وفيها نُشَفِّر خبرتنا في معادلات تمثِّل سلوك الأجسام الكلاسيكية من خلال أشياء، على غرار الكتلة والسرعة والزخم والتسارع[1]. يمكننا القول إننا نُجبَر على الاعتراف بهذه الذاتية في ميكانيكا الكم فقط، وذلك عندما نجابه في النهاية التبعات الشاذة لتبني منظور واقعي.

إلا أن فيوكس يذهب إلى أن الكيوبيزمية ليست أداتية. يستلهم العديد من حجج جون ويلر، ويفضل التفكير في التفسير باعتباره متضمنًا نوعًا من «الواقعية التشاركية» participatory realism (سوف نأتي على ذكرها فيما يلي). لا تعني هذه التشاركية الإدراك perception والخبرة البشريين، الضروريين من أجل التكهن بشيء من لا شيء و«جعله واقعيًّا»، وهو ما

(١) يتحدث ميرمين عن CBism المناظر الكلاسيكي لـ Qbism. انظر: N. David Mermin, 'Making Better Sense of Quantum Mechanics', arXiv:quant-ph/1809.01639v1, 5 September 2018.

يتضمن رفض الفرضيتين #١ و#٢. بدلًا من ذلك تذهب الكيوبيزمية ببساطة إلى أننا لا نستطيع في ميكانيكا الكم الاستمرار في تجاهل حقيقة أننا جزءٌ لا يتجزَّأ من الواقع الذي نحاول بشدة وفي استماتة وصفه(١):

تقتحم الكيوبيزمية منطقة تتردَّد في دخولها الغالبية العظمى من أولئك الذين يعلنون امتلاكهم منظورًا علميًّا كونيًّا. وما من شكٍّ في أن العناصر الفاعلة (الراصدين) يؤثرون في بناء العالم الحقيقي مثلما تؤثر الإلكترونات والذرات تمامًا، إن العناصر الفاعلة التي تَستخدم نظرية الكم ليست عَرَضية بالنسبة إليها.

تتطلَّب إعادة بناء هاردي المُسَلَّماتية والتواريخ المتسقة والكيوبيزمية جميعها نوعًا من المقايضة الجوهرية، نعم، تتبدَّد كل المعضلات ونستطيع نسيان أمرها، إلا أننا نُترك كي نتدبر واقعًا تشكِّله الاحتمالات، ولا شيء أكثر، أو كي نتخلَّى عن فكرة نسخة الحقيقة التاريخية المنفردة، أو نُترك مع واقع ذاتي وتشاركي في جوهره. من الواضح أنه يستحيل على أي من هذه المحاولات أن توفِّر لنا أي تبصر جديد بالفيزياء الكامنة أو أي فهم مختلف لها، إنها محاولات سلبية لإعادة البناء أو التفسير، ليست إيجابية أو فاعلة في سياق الفرضية #٤.

حتى لو لم تعد سيلا تحبسنا، إلا أنه من الواضح أننا ما زلنا معرضين لمفاتنها الوحشية في قسوة، ومن ثمَّ لم ننجح في الإبحار بالسفينة بعيدًا جدًّا.

---

(١) Chrisopher A. Fuchs, 'On Participatory Realism', arXiv:quantph/1601.04360v3, 28 June 2016, p. 11

الفصل السابع

ميكانيكا الكم غير مكتملة لذلك نحن بحاجة إلى إضافة بعض الأشياء

التفسيرات الإحصائية المبنية على متغيرات خفية محلية ولا محلية معماة

يلخص الفصلان الخامس والسادس تفسيرات ميكانيكا الكم التي نبعت من إرث كوبنهاجن. تقوم هذه التفسيرات على مجموعة من التصورات الميتافيزيقية المسبقة التي تميل إلى جانب لا واقعية بور وهايزنبرج (خصوصًا هايزنبرج)، تقوم على افتراض أن ميكانيكا الكم مكتملة. في عالم الكم الذي يتعذَّر الوصول إليه، ننتهي إلى التعامل مع الحدِّ بين الأشياء في نفسها والأشياء كما تبدو وهو الأمر الذي حذَّرنا منه الفلاسفة لقرون. كان علينا قبول حقيقة أنه لا شيء هنا كي نراه، وأننا قد بلغنا نهاية الطريق.

إلا أن هذا المنظور اللا واقعي ليس ذائقة الجميع، إذ أوضح المُنَظِّر جون بيل كل شيء في عام ١٩٨١ [١]:

---

(١) John Bell, Journal de Physique Colloque C2, Supplement 3, 42 (1981), 41–61. Reproduced in J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987), pp. 139–58. This quote appears on p. 142.

«تحت ضغط الضرورة، وتأثرًا بالفلسفات الوضعية والأداتية، وصل الكثيرون إلى اعتناق أفكار، لا تذهب إلى صعوبة العثور على صورة مترابطة بل إلى إدانة محاولة البحث عن مثل هذه الصورة - إذا لم يكن هذا فعلًا غير أخلاقي بالفعل، إذن فهو غير احترافي بالتأكيد».

إذا جعلنا خيارنا الفلسفي الانضمام إلى جانب أينشتاين وشرودنجر وبوبر وتبنينا موقفًا أكثر واقعية، فليس أمامنا إلا إشراك الميتافيزيقي داخلنا. لا يمكننا الامتناع عن أن نفترض واقعًا يقبع فيما وراء البيانات التجريبية، واقعًا يكمن خلف الأشياء كما تبدو. علينا التسليم بأن ميكانيكا الكم غير مكتملة، والاستعداد للقيام بزياراتٍ إلى شواطئ الواقع الميتافيزيقي، على أمل العثور على شيء ما -أي شيء- قد يساعدنا على إكمالها.

قد نضل عند قيامنا بهذا، إلا أنني أظن صدقًا أن الامتناع عن محاولة ذلك ضد ما جُبِلت عليه الطبيعة البشرية.

بمجرد أن نفتح الباب للواقعية، نعود مباشرة إلى فوضى عارمة مرة أخرى. إن أي تفسيرات واقعية لميكانيكا الكم أو أي إعادة صياغة أو توسعة لها تجرُّ معها بالضرورة كلَّ التصورات الميتافيزيقية المسبقة المرتبطة بتلك الأمور، تلك التصورات التي تدور حول ما ينبغي للواقع أن يكون عليه. إذ يجب أن تتحدث عن كل الأشياء الشاذة التي يبدو أن ميكانيكا الكم تسمح بها، على غرار التراكبات الكمية التي صارت تتضمن الآن حالات فيزيائية واقعية (بدلًا من معلومات مشفَّرة)، والانهيارات اللحظية للدالة الموجية والتأثير الشبحي عن بُعد الذي يبدو

أن الأمر يستلزمه. عليها إما تفسير العشوائية واللا اتصالية المتأصلتين في ميكانيكا الكمِّ وإما محو تلك العشوائية واللا اتصالية واستعادة بعض معقولية الاتصالية، والسبب والنتيجة، إذ يوجِّهها إله متحرر من إدمان المقامرة. عليها أن تجد سبيلًا إلى جعل العالم الكمي متوافقًا مع العالم الكلاسيكي، مفسرة «الانقسام الخادع» العبثي بين الاثنين أو مجتنبة إياه.

من أين نبدأ؟

ألمح أينشتاين في مناظرته مع بور وفي مراسلاته مع شرودنجر إلى التفسير الإحصائي. تُشتق الاحتمالات الكمية في رأيه من مربعات الدوال الموجية[1]، تمثل فعليًّا احتمالات إحصائية، تتوزع متوسطاتها على أعداد كبيرة من الجسيمات الواقعية فيزيائيًّا. نلجأ إلى الاحتمالات لأننا جهلة بخواص وسلوكيات الأشياء الكمية الواقعية فيزيائيًّا. يختلف هذا للغاية عن التفسيرات اللا واقعية التي تلجأ إلى الاحتمالات المؤسَّسة على الخبرة السابقة لأننا لا نستطيع أن نقول أي شيء ذي مغزى عن الفيزياء الكامنة من ورائها. انشغل أينشتاين بهذه المقاربة في مايو ١٩٢٧. يتلخص الأمر في إدخال تعديلٍ على ميكانيكا الكم التي تجمع بين الموجة الكلاسيكية والصيغ الجسيمية بحيث تضطلع الدالة الموجية بدور «المجال المُرشِد» (بالألمانية Führungsfeld)، إذ ترشد أو «تدل» الجسيمات الواقعية فيزيائيًّا. تكون الدالة الموجية مسؤولة في هذا النوع من المخططات عن كل التأثيرات الموجية، على غرار الحيود والتداخل، إلا أن الجسيمات تحافظ على هيئتها الكاملة في صورة كيانات واقعية

---

(١) فعليًّا، المعاملات... حسنًا – لقد فهمت الآن، لذلك سوف أتوقف.

فيزيائيًا ومحددة المكان. ينبني تكييف أينشتاين لميكانيكا الكم على الموجات والجسيمات، بدلًا من الموجات أو الجسيمات مثلما يتطلب مبدأ التكامل أو تفسير كوبنهاجن.

إلا أن أينشتاين فَقَدَ حماسه تجاه المقاربة خلال أسابيع قليلة من صياغتها؛ لم تخرج كما كان يأمل. اتخذت الدالة الموجية دلالة أكبر من مجرد الدلالة الإحصائية، لقد كانت شؤمًا. ظنَّ أينشتاين أن المعضلة تكمن في أن الجسيمات البعيدة تبذل أحدها على الآخر نوعًا من القوى الغريبة، وهو الأمر الذي لم يحبِّذه بالفعل. إلا أن المشكلة الفعلية تمثَّلت في أن المجال المرشد قادرٌ على بذل تأثيرات شبحية لا محلية – أي أن تغيير شيء ما هنا يغيِّر لحظيًّا شيئًا ما آخر بعيدًا هناك. سحب أينشتاين الورقة البحثية التي كتبها بخصوص المقاربة، قبل أن تُنشَر، وظلَّت باقية في أرشيف أينشتاين مخطوطة بخط اليد[1].

سوف نعود إلى مثل هذا النوع من صيغ «الموجات الدليلية» pilot waves في الفصل الثامن. من المحتمل أن هذه الخبرة قادت أينشتاين إلى استنتاج ما آمن فيه في البداية (أنه من الممكن استكمال ميكانيكا

---

(١) Darrin W. Belousek, 'Einstein›s 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance', Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 27 (1996), 437–61.

بحث بيتر هولاند أسباب أينشتاين لرفض هذه المقاربة في 'What's Wrong with Einstein's 1927 Hidden-Variable Interpretation of Quantum Mechanics', Foundations of Physics, 35 (2005), 177–96; arXiv:quantph/0401017v1, 5 January 2004.

الكم من خلال صهر الموجة الكلاسيكية والمفاهيم الجسيمية معًا بشكلٍ أكثر مباشرة)، أعلن فيما بعد عن رأي يذهب إلى أن النظرية المكتملة قد تظهر من خلال مراجعة أكثر جذرية للبنية النظرية بالكامل. قد تُستبدَل بميكانيكا الكم في النهاية نظرية مجال موحد كبيرة ومخاتلة، استغرق البحث عنها أغلب طاقة أينشتاين الذهنية في العقود الأخيرة من حياته.

تُعرَف هذه المحاولة المبكرة لأينشتاين من أجل استكمال ميكانيكا الكم في العموم بصيغة المتغيرات الخفية أو «نظرية المتغيرات الخفية». تقوم على فكرة أن ثمة جانبًا ما في الفيزياء يحكم ما نراه في تجربة، إلا أنه لا يظهر في التمثُّل. سبقت هذه المقاربة بالتأكيد العديد من المقاربات المشابهة في تاريخ العلم. إذ كما أوضحت في السابق، تقوم صياغة بولتزمان لنظرية الديناميكا الحرارية الإحصائية على حركات «خفية» لذراتٍ وجزيئاتٍ واقعية. وقد جاءت محاولة أينشتاين المجهَضة لإعادة تصور ميكانيكا الكم على نحو مشابه، إذ إن مواضع وحركات الجسيمات الواقعية التي توجهها الدالة الموجية هي الخفية.

مع ذلك، طرح فون نيومان في كتابه المنشور عام ١٩٣٢ «الأسس الرياضية لميكانيكا الكم» برهانًا يبدو كأنما يوضح استحالة استيعاب ميكانيكا الكم لمتغيراتٍ خفية[1]، بدا أن هذه هي نهاية الأمر. إذا

---

(١) «يجدر بنا ملاحظة أننا لسنا بحاجة إلى المضي أبعد من ذلك في آلية «العوامل الخفية»، إذ صرنا نعرف الآن أنه يستحيل إعادة اشتقاق نتائج ميكانيكا الكم المتحققة من تلك الآلية». جون فون نيومان، الأسس الرياضية لميكانيكا الكم.

John von Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1955), p. 324.

كانت المتغيرات الخفية مستحيلة، فلماذا نرهق أنفسنا بطرح تخمينات بخصوصها؟

وساد الصمت بالفعل قرابة عشرين عامًا، ساد خلالها منظور كوبنهاجن الدوجمائي، وتسرب إلى الصيغ الرياضية وأصبح تفسير الفيزيائيين المعتاد الواعي أو غير الواعي. مضى مجتمع الفيزياء قدمًا وتوقَّف عن التساؤل عن الأمر، ورضي بأن يخرس ويجري الحسابات.

ثم كسر ديفيد بوم الصمت.

نشر بوم في فبراير ١٩٥١ كتابًا، يحمل ببساطة اسم «نظرية الكم» Quantum Theory، اتَّبع فيه الخط العام، ورفض التحدي الذي أثارته «صاعقة» ورقة أينشتاين وبودولسكي وروزين البحثية، مثلما فعل بور، إلا أنه بينما كان يكتب الكتاب، انتابته الشكوك؛ شعر أن ثمة شيئًا خاطئًا بالفعل.

رحَّب أينشتاين بالكتاب، ودعا بوم إلى لقاء معه في برينستون في وقتٍ ما في ربيع عام ١٩٥١. تبلورت الشكوك بخصوص تفسير نظرية الكم -التي كانت قد بدأت تزحف على عقل بوم- في معضلة محددة تمامًا. كتب بوم لاحقًا: «كان لهذا اللقاء تأثيرٌ قويٌّ على اتجاه بحثي، لأنني أصبحتُ من بعده مهتمًّا بشكلٍ جادٍ بالتساؤل عن إمكانية العثور على إضافة لنظرية الكم تستوعب الحتمية»[1]. حَوَّل تفسير كوبنهاجن

---

(١) بحسب باسل هيلي، وهو واحد ممن تعاونوا مع بوم لفترة طويلة، يقول بوم عن لقائه بأينشتاين: «بعد أن انتهيتُ من (كتاب نظرية الكم) شعرتُ بشدة بوجود خطأ ما كبير. لا مكان في نظرية الكم لمفهوم مناسب للواقعية الفردية. زادت نقاشاتي مع أينشتاين من وضوح رأيي وعزَّزته وشجعتني على معاودة البحث مرة أخرى.» D. Bohm and Y. Aharonov, 'Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky', Physical Review, 108 (1957), 1070.

ما كان بالفعل منهجًا لإجراء الحسابات فقط إلى تفسير للواقع، أما بوم فكان أكثر إخلاصًا للتصورات حول الحتمية والسببية، ربما أكثر مما ظنه هو نفسه في البداية.

جزم بوم في كتابه «نظرية الكم» أنه «لا توجد نظرية للمتغيرات الخفية المحددة ميكانيكيًّا يمكن أن تؤدي إلى كل نتائج نظرية الكم»(١)، وقد ثبت نفاذ بصيرة هذه العبارة. واصل بوم نحو تطوير اشتقاق من تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين الذهنية، نُشِر هذا الاشتقاق من التجربة في ورقتين بحثيتين في عام ١٩٥٢ واستفاض فيه مع ياكير أهارونوف في عام ١٩٥٧ (٢). ويقوم على فكرة تحطيم جزيء ثنائي الذرة (مثل جزئي الهيدروجين، H_2) إلى ذرتين.

لا تقتصر طرق التميز بين الجسيمات الأولية على مقارنة خاصيتي الشحنة الكهربية والكتلة فقط، بل يمكن التمييز بينها كذلك عن طريق مقارنة خاصية أخرى كذلك ندعوها اللف المغزلي. يتمُّ اختيار هذا الاسم عن القليل من سوء الحظ، والسبب أن بعض الفيزيائيين في عشرينيات القرن العشرين ظنُّوا أن الإلكترون يتصرَّف مثل كرة صغيرة من مادة مشحونة، تلفُّ حول محورها مثلما تلفُّ الأرض حول محورها بينما تدور حول الشمس، ليس هذا ما يحدث، إلا أن الاسم التصق.

---

(١) David Bohm, Quantum Theory (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1951), p. 623.

(٢) D. Bohm and Y. Aharonov, 'Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky', Physical Review, 108 (1957), 1070.

ترتبط ظاهرة اللف المغزلي الكمية فعليًّا بالزخم الزاوي للجسيم، وهو الزخم الذي نربطه بحركة الدوران. ونظرًا إلى أن الإلكترون الذي يلف لفًّا مغزليًّا يحمل شحنة كهربية، فإنه يتصرَّف مثل المغناطيس، إلا أنه ينبغي لك ألَّا تفكر في أن هذا يحدث لأن الإلكترون يلف بالفعل حول محوره. وإذا أردنا أن نمضي في هذا التشبيه المجازي، إذن نحتاج إلى قبول أن الإلكترون يجب أن يلف مرتين حول محوره كي يعود إلى حيث بدأ[1]. يمتلك الإلكترون هذه الخاصية لأنه جسيمٌ من جسيمات المادة التي تُدعى «فرميونات» (تيمنًا بإنريكو فرمي). يمتلك عددَ كمٍّ مغزلي خاصًّا مقداره ½ واتجاهين للدوران – اتجاهين يمكن لمغناطيس الإلكترون الضئيل أن «يشير» إليهما في مجال مغناطيسي خارجي. ندعوهما «لف مغزلي علوي» (↑) و«لف مغزلي سفلي» (↓). يبدوان مألوفين؟

تتشكَّل الرابطة الكيميائية التي تربط الذرتين معًا في الجزيء ثنائي الذرة من تداخل مداري إلكترونيْ الذرتين والمزاوجة فيما بينهما، لذلك يكون لهما لفَّان مغزليان متعاكسان – ↓↑، بمعنى آخر، يكون الإلكترونان

---

(١) فكر في الأمر على هذا النحو.

اصنع شريط موبيوس،



شريط موبيوس

وذلك عن طريق لوي الشريط مرة ثم لصق نهايتيه معًا، وعلى ذلك يصير الشريط متصلًا باستمرارٍ. يصير لديك حلقة من الشريط لها «جانب» واحد وحيد. (ليس لها سطحٌ داخلي وسطح خارجي). والآن تصوَّر نفسك تسير على طول هذا الشريط، تجد أنك كي تعود إلى حيث بدأت، تحتاج إلى المشي مرتين حول الحلقة.

في الرابطة الكيميائية متشابكين. تخيل بوم وأهارونوف تجربة، تنكسر فيها الرابطة الكيميائية بطريقة تحافظ على اتجاهي اللف المغزلي للإلكترونين (تحافظ فعليًا على الزخم الزاوي الكلي للإلكترونين) في الذرتين. تصير لدينا إذن ذرتان – لندعوهما الذرة A والذرة B – متشابكتين في حالتي لفٍّ مغزلي ↑ و↓.

أنزل بوم وأهارونوف تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين من أبراج الفكر المحض العاجية إلى عالم معمل الفيزياء العملي. في الحقيقة، كان الهدف من ورقتهما البحثية المنشورة عام ١٩٥٧ الزعم بأن التجارب القادرة على قياس الارتباطات بين الجسيمات البعيدة المتشابكة قد تحققت بالفعل. بالنسبة إلى القلة من الفيزيائيين الذين يولون هذه الأمور انتباههم، فقد طرح جزم بوم ومفهوم الاختبار العملي احتمالاتٍ تعصف بالذهن.

كان جون بيل ممن يولون الأمر عنايتهم. في عام ١٩٦٤، كان لديه تبصُّر بخصوص إعادة تشكيل كاملة للأسئلة المتعلقة بتمثُّل الواقع على المستوى الكمي. بعد أن راجع بيل «برهان الاستحالة» لفون نيومان ورفضه واعتبره معيبًا وغير ذي صلة، استدلَّ على ما سوف يصبح معروفًا باسم «لا متساوية بيل». يشرح الأمر لاحقًا قائلًا: «من المحتمل أنني صغتُ المعادلة في رأسي وعلى الورق خلال أسبوع واحد تقريبًا، إلا أنني في الأسابيع السابقة كنت أفكر بشدة في كل ما يدور حول هذه الأسئلة، وخلال السنة الماضية كانت في مؤخرة رأسي باستمرارٍ»[1].

---

(١) John Bell, in P. C. W. Davies and J. R. Brown (eds), The Ghost in the Atom (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1986), p. 57.

تَذَكَّر من الفصل الرابع أن تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين تقوم على خلق زوجيْن من الجسيمات المتشابكة، A وB، نفترض الآن أنهما ذرَّتان. وبما أن الزخم الزاوي الكلي محفوظ، نعرف أن الذرتين يجب أن تمتلكا حالتين متعاكستين للف مغزلي علوي ولف مغزلي سفلي، وسوف نواصل كتابتهما على هذه الصورة $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ و$A_{\downarrow}B_{\uparrow}$. نفترض أن الذرتين A وB تفترقان باعتبارهما «واقعيتين محليًّا»، وهو ما يعني أنهما تحافظان على هويتين منفصلتين ومستقلتين وخواص منفصلة ومستقلة كذلك، بينما تتحركان مبتعدتين.

نفترض بعد ذلك أن القيام بأي نوع من أنواع القياس على A لا يمكن بأي حال أن يؤثِّر في خواص B وسلوكها اللاحق، ومع هذين الافتراضين، عندما نجري أيَّ قياس على A لنجدها في حالة ↑، حينئذٍ نعرف في يقين أن B يجب أن تكون في حالة ↓. لا يوجد في ميكانيكا الكم ما يفسِّر كيف قد يحدث هذا، النظرية غير مكتملة، وتصير لدينا معضلة كبيرة، إن هذا هو جوهر تحدي أينشتاين وبودولسكي وروزين الأصلي.

إلا أن ثمة سؤالًا، هل أي من هذا غريبٌ فعليًّا؟ كان بيل يراقب باستمرارٍ أمثلة يومية لأزواجٍ من الأشياء المفترقة مكانيًّا إلا أن خواصَّها مترابطة، إذ إنها توفر نظائر يسيرة لتجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين. عثر على مثالٍ جيدٍ للغاية في ذوق أحد زملائه في الملابس التي

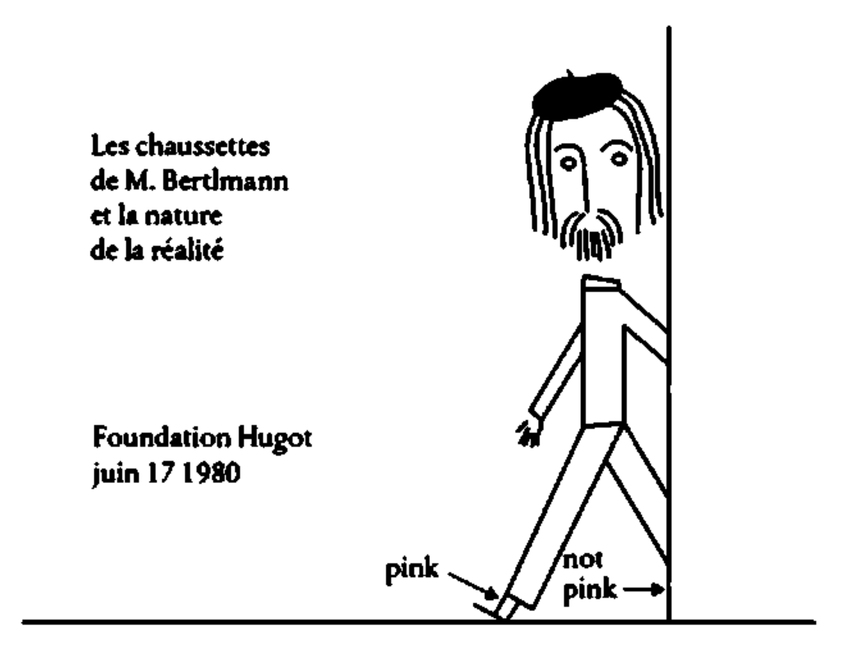
يرتديها، رينولد بيرتلمان، زميله في سيرن CERN، كتب بيل بعد بعض السنوات[1]:

«لن يهتم فيلسوفٌ يسير في الطرقات بارتباطات أينشتاين وبودولسكي وروزين على الإطلاق، إذا لم يكن قد تحمَّل مشقة دراسة منهج دراسي في ميكانيكا الكم، إذ يمكنه الإشارة إلى العديد من أمثلة الارتباطات المشابهة في الحياة اليومية. غالبًا ما أعضد رؤيتي هذه بذكر جوارب بيرتلمان، يحب دكتور بيرتلمان ارتداء جوربين من لونين مختلفين، لا يمكننا التنبؤ أبدًا بلون الجورب الذي سوف يرتديه في قدم معينة في يوم معين، إلا أنك عندما ترى أن لون الجورب الأولورديٌّ، يصير لديك يقينٌ أن الثاني لن يكون ورديًّا. يوفر لنا رصد الجورب الأول وخبرتنا ببيرتلمان معلوماتٍ مباشرة عن الجورب الثاني، لا يوجد ما يبرِّر ذوقه، إلا أنه بغض النظر عن ذلك، لا وجود لأي غرابة هنا. ألا تنشغل تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين بالأمر نفسه؟».

رسم بيل نفسه هذا الموقف، وهو موضَّح بالشكل رقم ١٢:

---

(١) يُعرف هذا باسم جهاز شتيرن جيرلاخ، تيمنًا بالفيزيائيين أوتو شتيرن ووالتر جيرلاخ، اللذين عرضا التأثير باستخدام ذرات فضة في عام ١٩٢٢. يمرُّ تيارٌ من ذرات الفضة بين قطبي مغناطيس يقسمها إلى نصفين متساويين - ينحرف أحد النصفين إلى الأعلى نحو القطب الشمالي، وينحرف النصف الآخر إلى الأسفل نحو القطب الجنوبي - في اتساقٍ مع الانتظام العشوائي (٥٠ : ٥٠) للف المغزلي للإلكترون الخارجي للذرات ↑ و↓.



شكل رقم (١٢) جوارب بيرتلمان وطبيعة الواقع

ماذا إذا كانت الحالتان الكميتان للذرتين A وB تحدَّدت عن طريق عمل بعض المتغيرات الخفية المحلية في اللحظة التي تشكَّلتا فيها، ومثلما كان الحال مع جوارب بيرتلمان تمامًا، تحركت الذرَّتان منفصلتين في حالتين كميتين سابقتي التحديد؟ يبدو هذا منطقيًّا تمامًا، ومتفقًا بالكامل مع بداهتنا الأولى. لا يمكننا إنكار العشوائية، كما لا يمكننا إنكار أن بيرتلمان قد يختار ارتداء الجورب الوردي في قدمه اليسرى أو اليمنى عشوائيًّا، ولذلك قد تُوَلِّد المتغيرات الخفية عشوائيًّا النتيجتين A↑B↓ أو A↓B↑، إلا أنه ما دام اللف المغزلي للذرتين A و B كان متعاكسًا دومًا، بدا كل شيء على ما يرام ضمن حدود قوانين الفيزياء.

كيف يحدث هذا؟ حسنًا، ليست لدينا أي وسيلة لمعرفة ما الذي قد تكونه هذه المتغيرات الخفية أو ما الذي قد تفعله، إلا أننا هنا على شواطئ الواقع الميتافيزيقي حيث نحظى بحرية تامة للتخمين، لذا، دعنا نفترض أن لكل ذرة خاصية ما أخرى، لا نعرف عنها شيئًا، إلا أننا نفترض أنها تعمل على تحديد اللف المغزلي ل A وB بشكلٍ مسبقٍ في أي قياسات لاحقة. يمكننا التفكير في هذه الخاصية على أنها مؤشرٌ صغيرٌ للغاية مخبأ داخل كل ذرة يمكن له أن يشير إلى أي اتجاه على محيط كرة. عندما تتكوَّن الذرتان A وB عن طريق كسر الرابطة في الجزيء، يستقر المؤشران الخاصان بالذرتين في موضعيهما، إلا أنهما ملتزمان باتخاذ اتجاهين متعاكسين دائمًا من أجل حفظ الزخم الزاوي.

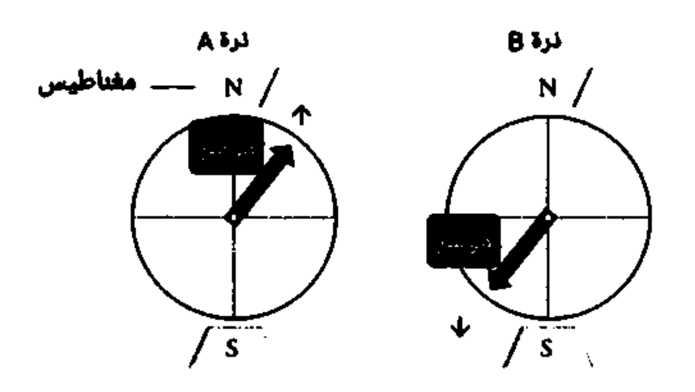
تتحرك الذرتان منفصلتين، بتحدد مكان المؤشرين. تمرُّ الذرة A (المرسومة بالأسفل على اليسار) بين قطبي مغناطيس، يسمح لنا بقياس اتجاه اللف المغزلي الخاص بها[1].

تمرُّ الذرة B (المرسومة على اليمين) بين قطبي مغناطيس آخر، يتخذ الاتجاه نفسه الذي للمغناطيس على اليسار ويحاذيه. سوف نحافظ على سهولة هذا الأمر بالفعل. إذا سقط مؤشر أي من A أو B على أي مكان في نصف الدائرة (الشمالي)، والمُعرَّف من خلال علاقته بالقطب

(١) John Bell, 'Bertlmann's Socks and the Nature of Reality', Journal de Physique Colloque C2, Supplement 3, 42 (1981), 41–61. Reproduced in Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987), pp. 139–58. This quote appears on p. 139.

الشمالي للمغناطيس المقابل له (توضحه المساحة المظللة في شكل رقم ١٣)، تكون نتيجة قياسنا أن الذرة في حالة ↑. إذا استقرَّ المؤشر في نصف الدائرة «الجنوبي» (المساحة غير المظللة)، تكون نتيجة قياسنا أن الذرة في حالة ↓. يوضح لنا الشكل رقم ١٣ كيف يقود اتجاه معين للمؤشر إلى نتيجة القياس A↑B↓ (إلا أن هذا الاتجاه قد أُختير عشوائيًّا).

إذا أجرينا سلسلة من القياسات على أزواج من الذرات المُعَدَّة على نحوٍ متماثل، نتوقع الحصول على سلسلة من نتائج عشوائية: A↓B↑، A↓B↑، A↑B↓، A↓B↑، A↑B↓، A↑B↓ وهكذا. إذا افترضنا أن سقوط المؤشر في كل زوجين يمكن أن يتوزع عشوائيًّا على الدائرة بأكملها لكن وفق نسقٍ واحد، يمكننا أن نرى إذن في عددٍ من القياسات ذات الدلالة الإحصائية أن احتمالية الحصول على النتيجة A↑B↓ هي ٥٠٪.



نتيجة القياس A↑B↓

شكل رقم ١٣: قد تفسر المتغيرات الخفية المحلية ببساطة ترابُط اللف المغزلي لذرتيْن هيدروجين متشابكتين، نفترض أن نتيجتي القياس تحدَّدتا مسبقًا عن طريق «مؤشر» في كل ذرة، يَثبُت اتجاهه في لحظة تكوّن الذرتين.

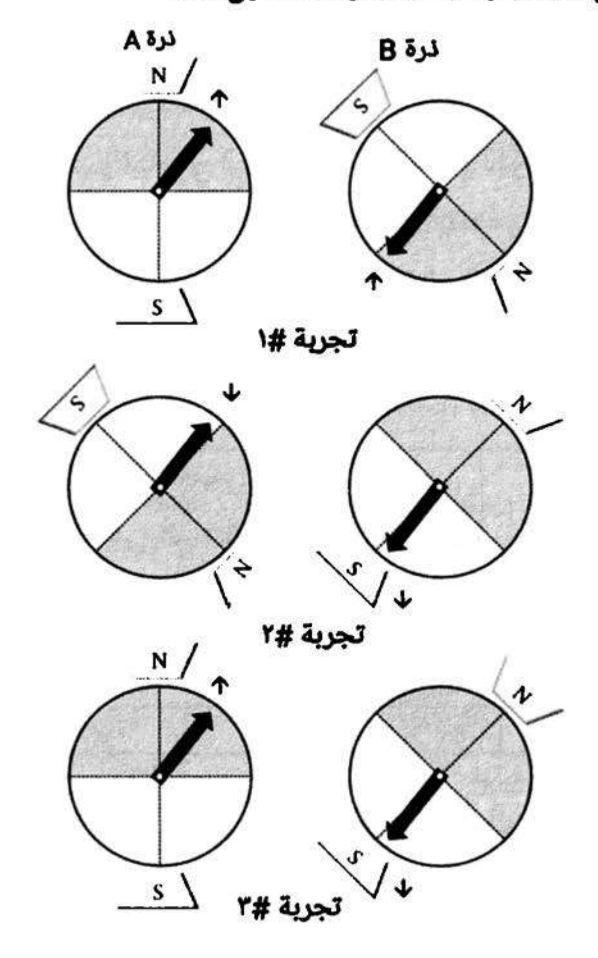
وهنا يُدخِل بيل مستوى جديدًا تمامًا من المخاتلة. يوضح الشكل رقم ١٣ تجربة، المغناطيسان فيها متحاذيان – يتخذ القطبان الشماليان للمغناطيسين الاتجاه نفسه. والآن، ماذا لو أدرنا أحد المغناطيسين بالنسبة إلى الآخر؟ تذكر أن نصفي الدائرة «الشمالي» و«الجنوبي» مُعرَّفان من خلال اتجاه قطبي المغناطيس، لذلك إذا أُدير المغناطيسان، يدور نصفا الدائرة بالمثل كذلك. إلا أننا نفترض بالطبع أنَّ مؤشري المتغيرات الخفية نفسيهما مستقرَّان وثابتان في المكان في اللحظة التي تكوَّنت فيها الذرَّتان – من المفترض أن الاتجاهين اللذين يشير إليهما المؤشران قد تحدَّدا عن طريق الفيزياء الذرية ويستحيل أن يتأثَّرا بالكيفية التي قد نختار أن نُوَجِّه بها المغناطيسين في المعمل، من المفترض أنَّ الذرتين واقعيتان محليًّا.

افترض أننا أجرينا ثلاث تجارب:

	اتجاه المغناطيس الخاص بالذرة A	اتجاه المغناطيس الخاص بالذرة B	الاختلاف بين زاويتي المغناطيسين
تجربة # ١	٠°	١٣٥°	١٣٥°
تجربة # ٢	١٣٥°	٤٥°	٩٠°
تجربة # ٣	٠°	٤٥°	٤٥°

يوضِّح شكل رقم ١٤ كيف تؤثِّر إدارة أحد المغناطيسين بالنسبة إلى المغناطيس الآخر –مع اتجاه حركة دوران عقارب الساعة– في نتيجتي قياس اتجاهي المؤشرين نفسيهما المستخدمين في شكل رقم ١٣. في تجربة #١، تعني إدارة المغناطيس الخاص بالذرة B بمقدار ١٣٥° أن مؤشر B قد حَدَّد مسبقًا حالة ↑، لنحصل على النتيجة A↑B↑. لا يعني

هذا أننا كسرنا أي قانون من قوانين الحفظ - لا يزال مؤشرا المتغيرات الخفية ل A وB يشيران إلى اتجاهين متعاكسين. يعني هذا أننا فتحنا التجربة لنطاق أعرض من النتائج فقط: إدارة مغناطيس الذرة B يعني أن النتيجتين A↑B↑ وA↓B↓ صارتا ممكنتين الآن.

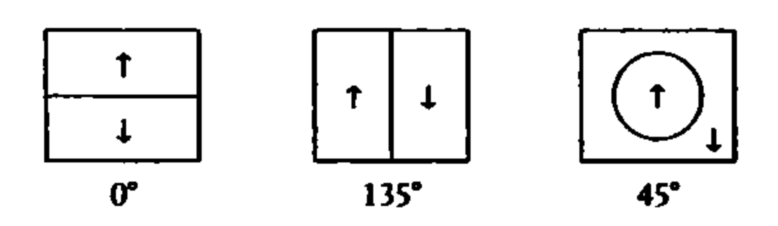


شكل رقم ١٤: أدخل بيل مستوى جديدًا تمامًا من المخاتلة على نسخة بوم - أهارونوف من تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين عن طريق إدارة الاتجاهين النسبيين للمغناطيسين.

وبما أن مجموع احتمالات كل النتائج الممكنة لا يزال ١٠٠٪ يمكننا توقُّع أن نتائج A↑B↓ وA↓B↑ يجب أن تقل لذلك السبب.

السؤال الذي أرغب في طرحه في كل تجربة من هذه التجارب: ما هي احتمالية الحصول على النتيجة A↑B↓؟ قبل التسرُّع في إيجاد الإجابات، أودُّ أولًا التأسيس لبعض العلاقات العددية بين احتمالات النتائج في كل تجربة، لا أريد الوقوع في مستنقع الرياضيات هنا، لذلك أقترح القيام بذلك تخيليًّا[1].

تخيل أننا نرسم خريطة للنتائج ↑ و↓ -بغض النظر ما إذا كانت النتائج تتعلَّق ب A أو B- وذلك مع كل اتجاه للمغناطيس. بالنسبة إلى المغناطيس الذي يتخذ زاوية ٠°، نقسم مربعًا إلى نصفين متساويين علوي وسفلي، بالنسبة إلى المغناطيس الذي يتخذ زاوية ١٣٥° نقسم مربعًا إلى نصفين متساويين يسار ويمين. نحتاج إلى أن نكون أكثر قدرة على التخيُّل من أجل تصوُّر الأمر في حالة المغناطيس الذي يتخذ زاوية ٤٥°، إذ إن لدينا بُعدين فقط كي نلعب بهما، لذلك نرسم دائرة داخل مربع، بحيث تكون مساحة الدائرة مساوية للمساحة التي تقع داخل المربع لكنها خارج الدائرة، نحصل بذلك على التالي:



(١) يتأسس هذا التصور التخيلي على Bernard d'Espagnat, 'The Quantum Theory and Reality', Scientific American, 241 (1979), 158–81. See p. 162.

يمكننا الآن جمع هذه الأشكال في مخططٍ واحدٍ، وهو ما يسمح لنا برسم النتائج التي تسفر عن A↑B↓ في كل تجربة من تجاربنا. على سبيل المثال، في تجربة #١ تشغل النتائج التي قيست فيها A لنجدها في حالة ↑ وB في حالة ↓ الركن الأعلى إلى اليمين من الخريطة، والموضحة في الخريطة باللون الرمادي، ويسري الأمر نفسه على التجربتين #٢ و#٣.

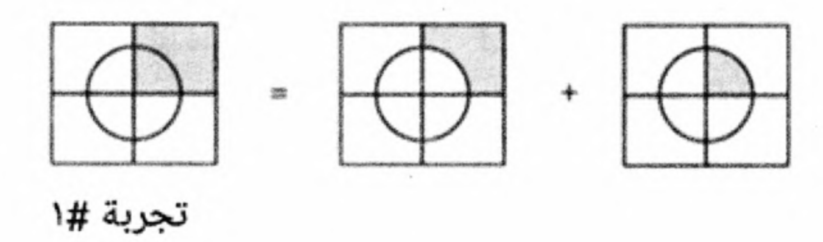


تجربة #٣ تجربة #٢ تجربة #١

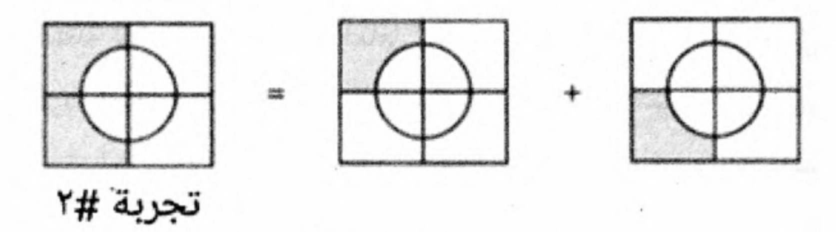
علينا أن ننتبه من جديدٍ أن هذا ينجح فقط إذا كنَّا نفترض أن الذرة A والذرة B منفصلتان تمامًا، ومتمايزتان، وأن إجراء قياسات على إحداهما، يستحيل بأي حال أن يؤثِّر في نتائج القياسات على الأخرى، يجب أن نفترض أن الذرتين واقعيتان مكانيًّا.

إذا كان هذا قد يساعد، فكر في المساحات الرمادية في هذه الأشكال على أنها الأماكن التي نضع فيها ملصقًا في كل مرة نحصل على النتيجة A↑B↓ في كل تجربة. نجري كلَّ تجربة على العدد نفسه من أزواج الذرات، ونعد الملصقات التي نحصل عليها. نحصل على احتمالية الحصول على النتيجة A↑B↓ في كل تجربة عن طريق قسمة عدد الملصقات على العدد الكلي للأزواج التي ندرسها.

في الحقيقة، تمثِّل هذه الأشكال مجموعات من الأعداد، لذلك دعنا نحظى ببعض المرح معها، يمكننا كتابة مجموعة التجربة #١ على اعتبار أنها مجموع مجموعتين جزئيتين أصغر.



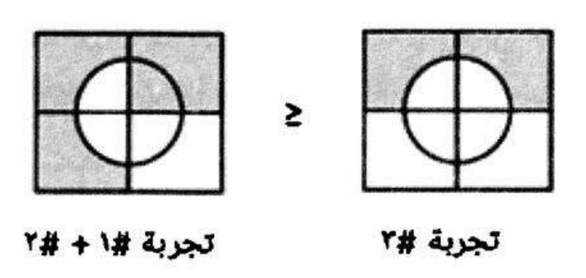
وبالمثل، يمكننا كتابة مجموعة التجربة #٢ كالتالي:



إذا جمعنا هاتين الصياغتين معًا، نحصل على التالي:



لا يمكننا استبعاد احتمالية أن المجموعة الجزئية الأخيرة في هذه الصياغة قد تفتقد بعض الملصقات فيها، لكنني أظن أنكَ سوف تتفق تمامًا مع أنه من الآمن لنا استنتاج التالي:



حيث يعني الرمز ≤ «أكبر من أو يساوي»، هذه هي لا متساوية بيل. ليست لها فعليًّا علاقة -أيًّا ما كانت- بميكانيكا الكم أو بالمتغيرات الخفية، إنها ببساطة استنتاجٌ منطقي مستقى من العلاقات بين مجموعات مستقلة للأعداد، إنها عامة تمامًا أيضًا. لا تعتمد كذلك على شكل نظرية المتغيرات الخفية التي قد نبتدعها – مهما كان، شريطة أن تكون المتغيرات الخفية واقعية محليًّا. سمحت هذه العمومية لبيل بصياغة نظرية «محظورات» no-go theorem: «إذا كان «المتغير الخفي» المضاف متغيرًا خفيًّا محليًّا، فلن يتفق مع ميكانيكا الكم، وإذا اتفق مع ميكانيكا الكم فلن يكون محليًّا»[١]. في عام ١٩٦٧ ابتكر سيمون كوشين وإرنست سبيكر نظرية محظورات تكاملية[٢].

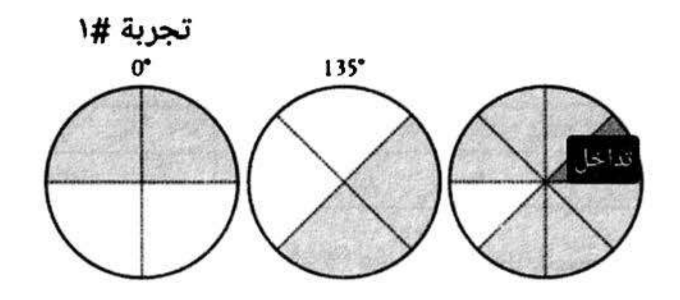
---

(١) John Bell, 'Locality in Quantum Mechanics: Reply to Critics', Epistemological Letters, November 1975, pp. 2–6. This paper is reproduced in Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, pp. 63–6. This quote appears on p. 65.

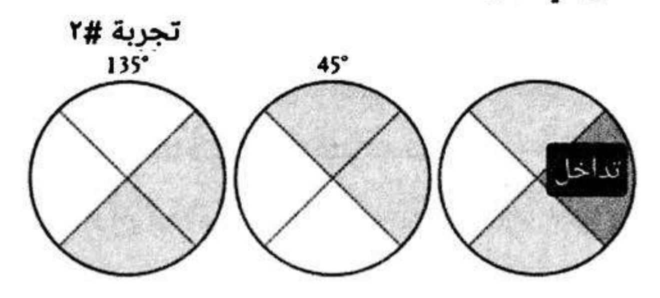
(٢) Simon Kochen and E. P. Specker, 'The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics', Journal of Mathematics and Mechanics, 17 (1967), 59–87.

تقول هذه الصورة من لا متساوية بيل إنه عند إضافة احتمالية الحصول على A↑B↓ في تجربة #١ إلى احتمالية الحصول على A↑B↓ في تجربة #٢ يكون الناتج أكبر من أو على الأقل يساوي احتمالية الحصول على A↑B↓ في تجربة #٣.

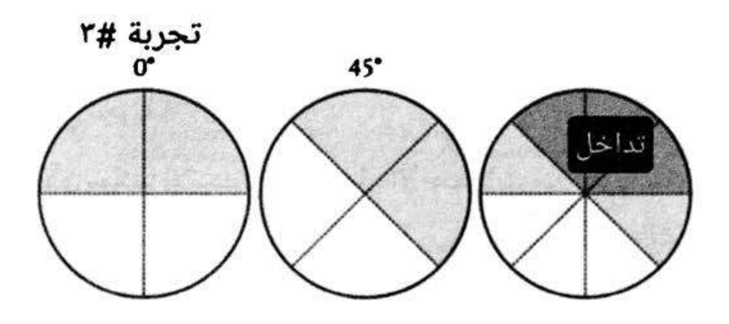
والآن يمكننا الاستدلال على هذه الاحتمالات من نظرية متغير خفي محلي بسيطة عن طريق فحص التداخل بين نصفي الكرة «الشماليين» للمغناطيسين في كل تجربة، والقسمة على ٣٦٠°. نعرف من الشكل رقم ١٣ أن التداخل الكامل ١٨٠° (المغناطيسان متحاذيان) يعني أن احتمالية الحصول على A↑B↓ تقدَّر ب ٥٠٪. يقل التداخل في تجربة #١ إلى ٤٥° وتقل احتمالية الحصول على A↑B↓ إلى ١٢,٥٪.



التداخل في تجربة #٢ ٩٠° (٢٥٪).



التداخل في تجربة #٣ ١٣٥° (٣٧,٥٪).



هذه النتائج مجموعة في الجانب الأيمن من الجدول التالي:

	احتمالية الحصول على A↑B↓ في نظرية متغيرات خفية محلية	احتمالية الحصول على A↑B↓ في ميكانيكا الكم
تجربة #١	١٢,٥٪	٧,٣٪
تجربة #٢	٢٥٪	٢٥٪
تجربة #٣	٣٧,٥٪	٤٢,٧٪

إذا جمعنا الآن احتماليتي #١ و#٢ معًا، نحصل على المجموع ٣٧,٥٪ وذلك بحسب نظرية متغيرات خفية محلية، وهو المجموع المساوي لاحتمالية #٣، وبالتالي يتسق تمامًا مع لا متساوية بيل.

إذن، ما الذي تتوقعه ميكانيكا الكم (من دون متغيرات خفية)؟ لا أريد أن أدخل في تفاصيل كثيرة للغاية هنا، ثق بي عندما أخبركَ أننا نحصل على توقُّع ميكانيكا الكم لاحتمالية الحصول على A↑B↓ عن طريق حساب نصف مربع جيب تمام نصف الزاوية بين المغناطيسين.

جُمِعت توقعات ميكانيكا الكم في العمود الأيسر من الجدول السابق، إذا وضعنا هذه التوقعات في لا متساوية بيل نحصل على النتيجة التالية: ٣,٧٪ + ٢٥٪ = ٣٢,٣٪ وهو ما يجب أن يكون أكبر من أو مساوٍ ل ٤٢,٧٪.

نكتشف أن ميكانيكا الكم تنتهك لا متساوية بيل، تتوقع أن مدى الترابط بين A وB قد يكون أحيانًا أكبر من، وأحيانًا أقل من ما قد تسمح به أي نظرية متغير خفي محلي.

إنها نتيجة مهمة للغاية، تستحق أن نأخذ بعض الوقت في إعادة التأطير لها، كي نفهم كيف وصلنا إلى هنا. سعى أينشتاين وبودولسكي وروزين إلى الكشف عن عدم اكتمال ميكانيكا الكم في تجربة ذهنية، تتضمن زوجين من الجسيمات المتشابكة. إذا تبنَّينا تفسيرًا واقعيًّا للدالة الموجية، إذن لا يمكن لقياسات نجريها على أحد الجسيمين أن تؤثِّر بأي صورة على نتائج القياسات التي نجريها على الجسيم الآخر، وعلى ذلك ثمة شيءٌ مفقودٌ بالتأكيد. أعاد بوم وأهارونوف تكييف هذه التجربة وبيَّنا كيف يمكن أن تُستخدم في اختبار عملي. مضى بيل إلى ما هو أبعد من ذلك، وطرح مستوى جديدًا تمامًا للمخاتلة وابتكر لا متساوية بيل.

ها هنا اختبار مباشر حقًّا: ميكانيكا الكم في مقابل المتغيرات الخفية المحلية، ما النظرية الصحيحة؟ هل انتُهِكت لا متساوية بيل عند التطبيق؟ إن هذا سببٌ أكثر من كافٍ كي نعود إلى متن سفينة العلم، ونشرع في الإبحار إلى الواقعية التجريبية.

كتب بيل ورقته البحثية في عام ١٩٦٤ إلا أنها لم تنشر حتى عام ١٩٦٦ بسبب بعض البلبلة[١]. احتاج العلم التجريبي إلى عشرة سنوات أخرى من أجل تطوير درجة التعقيد اللازمة للشروع في توليد بعض الإجابات الحاسمة.

ومع أن هذا النوع من التجريب لا يزال مستمرًّا إلى اليوم، ربما تكون أشهر هذه التجارب قد سُجِّلت في أوائل ثمانينيات القرن العشرين، قام بها آلان أسبيكت وزملاؤه في جامعة باريس. لم تؤسَّس هذه التجارب على الذرات المتشابكة والمغناطيسات، بل استخدموا أزواج الفوتونات المتشابكة، التي تُوَلَّد من إشعاع «متتابع» من ذرات كالسيوم مستثارة.

تمتلك الفوتونات -مثلها مثل الإلكترونات- زخمًا زاويًا غزليًّا، إلا أن ثمة فارقًا كبيرًا. الفوتونات «جسيمات قوى»، تحمل القوى الكهرومغناطيسية ويطلق عليها بوزونات (سُمِّيت تيمنًا بساتيندرا ناث بوز)، وعدد الكم المغزلي الخاص بها ١، لأن الفوتونات تسافر بسرعة الضوء. ثمة نوعان فقط لاتجاهات اللف المغزلي التي نربطها بالضوء المستقطب دورانيًّا إلى اليسار ↺ والمستقطب دورانيًّا إلى اليمين ↻، وذلك عند الحكم عليه من منظور مصدر الضوء. يستقر إلكترونا ذرة الكالسيوم الخارجيان في مدارٍ دائري، لفُّهما المغزلي متزاوج والزخم الزاوي لهما صفر. لذلك عندما يمتص أحدهما فوتونًا ويستثار إلى مدارٍ له طاقة أعلى، يلتقط كمًّا من الزخم الزاوي من الفوتون، لا يمكن لهذا

(١) John S. Bell, 'On the Problem of Hidden Variables in Quantum Theory', Reviews of Modern Physics, 38 (1966), 447–52. This paper is reproduced in Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, pp. 1–13.

الكم أن يدخل في اللف المغزلي للإلكترون، إذ إنه ثابتٌ. بدلًا من ذلك يذهب إلى حركة الإلكترون المدارية، ويدفعه إلى مدارٍ له شكلٌ مختلفٌ، من مدارٍ كروي إلى مدارٍ على شكل الدَمبل- انظر شكل ٦ج.

إلا أننا إذا ضربنا ذرة الكالسيوم المستثارة بفوتون آخر الآن، يمكننا إثارة الإلكترون الذي تُرِك في المدار الكروي، ليذهب كذلك إلى المدار على شكل الدَمبل. والآن توجد ثلاث حالات كمية ممكنة، تتوقف على الطريقة التي يجتمع بها اللف المغزلي والزخم الزاوي المداري للإلكترونين معًا، في واحدة من هذه الحالات يُلغى الزخم الزاوي ويكون صفرًا.

على الرغم من أن هذه الحالة غير مستقرة للغاية، فإنه لا يمكن لذرة الكالسيوم أن تشع فوتونًا ببساطة وتعود إلى المدار الدائري منخفض الطاقة، إذ يتضمن ذلك انتقالًا من دون تغير في الزخم الزاوي، ولا يوجد ببساطة فوتون لذلك. أظن أنك تدرك إلى أين يمضي بنا هذا. بدلًا من ذلك، تشع الذرة فوتونين في تتابُع سريع. لأحد الفوتونين طولٌ موجي مقابل للون الأخضر (سوف ندعوه الفوتون A) والطول الموجي للآخر مقابل للون الأزرق (الفوتون B). ولأنه لا يمكن أن يوجد تغير صافٍ في الزخم الزاوي، ويجب أن يكون الزخم الزاوي محفوظًا، يجب أن تكون للفوتونين المشعَّين حالتان متقابلتان للاستقطاب الدوراني.

إن الفوتونين متشابكان.

تكمن فائدة استخدام استقطاب الفوتون بدلًا من اللف المغزلي للإلكترونات أو الذرات في أننا نستطيع قياس استقطاب الضوء في

المعمل بسهولة تامة، باستخدام بلورات الكالسيت[١]، لا نحتاج إلى مغناطيسات صعبة الاستخدام.

بقي أمرٌ واحدٌ بسيطٌ، لا تقيس محللات الاستقطاب حالتي الاستقطاب الدوراني للفوتونات، بل تقيس الاستقطاب الأفقي ↔ والرأسي ↕،[٢] إلا أن هذا جيدٌ. ثمة احتمالية تقدَّر ب ٥٠٪ لمرور الفوتون المستقطب دورانيًّا لليمين أو لليسار إذا سقط على محلل استقطاب خطي مُوجَّه رأسيًّا، وهو الأمر الذي يحدث بالمثل مع محلل مُوجَّه أفقيًّا. والآن صرنا نعرف جيدًا أن الدالة الموجية الكلية المصاغة على أساس حالتي الاستقطاب الدوراني إلى اليسار وإلى اليمين يمكن تغيير صياغتها بسهولة، لتصاغ على أساس حالتي استقطاب أفقي ورأسي.

تستخدم المحللات لقياس حالتي الاستقطاب لكلا الفوتونين A وB، مثلما كان الحال في تجربة بيل المخاتلة. يُحمل الفوتونان على الدخول إلى منصتي عمل يمكن تدوير إحداهما بالنسبة إلى الأخرى. تكافئ هذه التجربة على الفوتونات المتشابكة تجربة بيل تمامًا.

ثمة نقطة أخرى مهمة، تُوضع مستكشِفات كل فوتون على مسافة

---

(١) الكالسيت هو أحد أشكال كربونات الكالسيوم يتميز بأنه يكسر الضوء طبيعيًّا كسرًا مزدوجًا. له بنية بلورية لها معاملا انكسار مختلفان على طول مستويين بلورين متمايزين. يوفِّر الأول محورًا لأقصى تمرير للضوء المستقطب عموديًّا، ويوفِّر الثاني محورًا لأقصى تمرير للضوء المستقطب أفقيًّا. وهو ما يؤدي إلى الفصل الفيزيائي للمكونين الرأسي والأفقي للضوء المستقطب دورانيًّا سواء إلى اليسار أو اليمين عن طريق المرور خلال البلورة، ويمكن قياس شدتيهما بشكلٍ منفصلٍ. مع التصنيع المتقن، يمكن لبلورة الكالسيت فعليًّا نقل كل الضوء الساقط عليها.

(٢) تقلل نظارات الشمس المُستَقطِبة من الوهج عن طريق تصفية الضوء المستقطب أفقيًّا واستبعاده.

١٣ مترًا من إحداهما للأخرى، على طرفين متقابلين للمعمل. يتطلب الأمر ٤٠ جزءًا من بليون جزء من الثانية كي تعبر أي إشارة تسافر بسرعة الضوء هذه المسافة. إلا أن التجربة أُعِدَّت من أجل رصد زوجي الفوتونات A وB اللذين يصلان خلال فاصل زمني يُقدَّر ب ٢٠ جزءًا من بليون جزءٍ من الثانية. بمعنى آخر، يحتاج أي تأثير شبحي عن بُعد يمرُّ بين الفوتونين -ويسمح للقياسات التي تُجرى على أحدهما بالتأثير في الآخر- إلى السفر بسرعة تفوق سرعة الضوء.

إن أقدامنا ثابتة الآن على شواطئ الواقع التجريبي، وعلينا الاعتراف بأن العالم الواقعي ربما لا يكون متعاونًا. يحدث بعض «التسريب» في محللات الاستقطاب، ولذلك لا توفر نتائج دقيقة بنسبة ١٠٠٪. من غير الممكن «جمع» كل الفوتونات المُشعَّة و«نقلها» إلى المستكشفات الخاصة بها، كما قد لا تكون المستكشفات نفسها ذات كفاءة تامة، إذ تسجل جزءًا فقط من الفوتونات التي تسقط عليها بالفعل، قد تؤدي فوتونات شاردة في مكان خاطئ ووقت خاطئ إلى خطأ في عدِّ الأزواج المرصودة.

يمكن موازنة بعض هذه العيوب العملية عن طريق توسيع التجربة وإدخال نسق رابع من المحلِّلات، وكتابة لا متساوية بيل بشكلٍ مختلفٍ قليلًا. فيما يخص مجموعة الأنساق المحددة التي درسها أسبكت وزملاؤه، تضع لا متساوية بيل حدًّا للمتغيرات الخفية المحلية أقل من أو يساوي ٢. تتوقع ميكانيكا الكم حدًّا أقصى يُقدَّر بضعفي الجذر التربيعي ل ٢، أو ٢,٨٢٨. حصل أسبكت وزملاؤه على نتيجة تقدَّر ب ٢,٦٩٧،

بهامش خطأ يُقدَّر بـ ± ٠١٥ , ٠، في انتهاكٍ واضحٍ للا متساوية بيل[١].
هذه النتائج صادمة تمامًا فعليًا. تجزم بأننا إذا أردنا تفسير الدالة الموجية واقعيًا، فسوف يبدو أن الفوتونين يحافظان على ارتباطٍ ملغز أحدهما بالآخر، ويتشاركان دالة موجية واحدة، حتى لحظة القياس الذي يُجرى على أحدهما أو الآخر. عند هذه اللحظة تنهار الدالة الموجية ويصير الفوتونان متمركزين في حالتي استقطاب ترتبطان ضمن مدى يستحيل تفسيره ببساطة في أي نظرية تقوم على المتغيرات الخفية المحلية. يبدو أن قياس استقطاب الفوتون A يؤثر في النتيجة التي سوف نحصل عليها بخصوص الفوتون B، والعكس بالعكس، حتى لو كان الفوتونان بعيدين أحدهما عن الآخر بمسافة كبيرة بحيث إن أي اتصال فيما بينهما يجب أن يكون أسرع من سرعة الضوء.

بالتأكيد، كانت هذه هي البداية فقط، بالنسبة إلى أولئك الفيزيائيين الذين يحتفظون بقناعاتٍ متجذرة تميل إلى جانب الواقعية، يجب أن يكون هناك أمرٌ ما آخر يجري. سألوا أسئلة إضافية: ماذا لو تأثَّرت المتغيرات الخفية على نحوٍ ما بالطريقة التي تُعَدّ بها التجربة؟ هذه هي البداية فقط لسلسلة من «منافذ الهروب» التي استشهدوا بها في محاولة لإقامة حجة، تذهب إلى أن هذه النتائج لا تستبعد بالضرورة كل نظريات المتغيرات الخفية المحلية التي من الممكن تصورها.

(١) Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger, 'Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem', Physical Review Letters, 47 (1981), 460–3. Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger, 'Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities', Physical Review Letters, 49 (1982), 91–4.

توقع أسبكت نفسه منفذ الهروب الأول هذا، وأجرى تجارب أخرى من أجل سدِّه. تعدل النسق التجريبي من أجل تضمين أجهزة، تستطيع تغيير مسارات الفوتونات عشوائيًّا، موجهة كل واحد منها نحو محلِّلات تتخذ اتجاهاتٍ مختلفة الزوايا. حرم هذا الفوتونات من «المعرفة» المسبقة للمسارات التي سوف تسافر على طولها، وبالتالي حرمها من «معرفة» المحلِّل الذي سوف تمرُّ من خلاله في النهاية. يكافئ هذا تغيير الاتجاهين النسبيين لمحللين بينما يكون الفوتونان في خضم رحلتيهما. لم يشكِّل ذلك فارقًا، لا تزال لا متساوية بيل منتهكة[١].

من غير الممكن التخلص من المعضلة ببساطة عن طريق زيادة المسافة بين مصدر الجسيمات المتشابكة والمستكشفات. أُجريت تجارب، وُضعت فيها المستكشفات في بالفيو وبيرنيكس - وهما قريتان سويسريتان صغيرتان خارج جنيف، تفصل بينهما مسافة تقدر بـ ١١ كيلومترًا[٢]. وضعت تجارب لاحقة المستكشفات في لابالما وتنريفي في جزر الكناري، تفصل بينهما مسافة تقدر ب ١٤٤ كيلومترًا. ولا تزال لا متساوية بيل منتهكة[٣].

---

(١) Alain Aspect, Jean Dalibard, and Gérard Roger, 'Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers', Physical Review Letters, 49 (1982), 1804–7.

(٢) W. Tittel, J. Brendel, N. Gisin, and H. Zbinden, 'Long-Distance BellType Tests Using Energy-Time Entangled Photons', Physical Review A, 59 (1999), 4150–63

(٣) Thomas Scheidl, Rupert Ursin, Johannes Kofler, Sven Ramelow, Xiao-Song Ma, Thomas Herbst, Lothar Ratschbacher, Alessandro Fedrizzi, Nathan K. Langford, Thomas Jennewein, and Anton Zeilinger, 'Violation of Local Realism with Freedom of Choice', Proceedings of the National Academy of Sciences, 107 (2010), 19708–13.

حسنًا، ماذا لو بقيت المتغيرات الخفية حساسة بطريقة ما للاختيارات العشوائية في إعدادات التجربة، لأن هذه الاختيارات تُتَّخذ ببساطة خلال الجدول الزمني نفسه؟ في تجربة أُعلِن عنها في عام ٢٠١٨، تتحدد الإعدادات بواسطة ألوان الفوتونات المرصودة من الكوازارات (الأنوية النشطة للمجرات البعيدة). لذلك فإن الاختيار العشوائي للإعدادات قد اتُّخِذ بالفعل قبل إجراء التجربة بثمانية بلايين عام تقريبًا، إذ إن هذا هو الوقت الذي يأخذه الفوتون المُحَفِّز للوصول إلى الأرض. ولا تزال لا متساوية بيل منتهكة[١].

ثمة منافذ أخرى للهروب، وقد سُدَّت جميعها في تجارب تتضمن كلًّا من فوتونات متشابكة وأيونات (ذرات مشحونة كهربية) متشابكة. أُجريت في عام ٢٠٠٠ تجارب تتضمن ثلاثيات من الفوتونات من أجل استبعاد كل أشكال نظريات المتغيرات الخفية الواقعية محليًّا من دون اللجوء إلى لا متساوية بيل[٢].

---

(١) Dominik Rauch, Johannes Handsteiner, Armin Hochrainer, Jason Gallicchio, Andrew S. Friedman, Calvin Leung, Bo Liu, Lukas Bulla, Sebastian Ecker, Fabian Steinlechner, Rupert Ursin, Beili Hu, David Leon, Chris Benn, Adriano Ghedina, Massimo Cecconi, Alan H. Guth, David I. Kaiser, Thomas Scheidl, and Anton Zeilinger, 'Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars', Physical Review Letters, 121 (2018), 080403.

(٢) Jian-Wei Pan, Dik Bouwmeester, Matthew Daniell, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, 'Experimental Test of Quantum Nonlocality in Three-Photon Greenburger-Horne-Zeilinger Entanglement', Nature, 403 (2000), 515–19.

إذا أردنا أن نتبنَّى تفسيرًا واقعيًا، إذن يبدو أنَّ علينا القبول بواقعٍ غير محلي، أو ينتهك على أقل تقدير السببية المحلية.

لكن ألا يزال من الممكن مقابلة الواقعية في منتصف الطريق؟ نفترض في هذه التجارب أن خواص الجسيمات المتشابكة محكومة بمجموعة ما من المتغيرات الخفية المعقدة جدًّا في الغالب، تمتلك هذه المتغيرات الخفية قيمًا متفردة تحدد بشكلٍ مسبقٍ الحالات الكمية للجسيمات وتفاعلاتها اللاحقة مع أجهزة القياس. نفترض كذلك أن الجسيمات تتشكل مصحوبة بتوزيعٍ إحصائي لهذه المتغيرات، تحدده الفيزياء (الطبيعة) فقط، ولا يتأثر بالطريقة التي تُعَدُّ بها التجربة.

تتميز نظريات المتغير الخفي المحلي بافتراضين آخرين، نفترض في الأول أن نتيجة القياس الذي يُجرى على جسيم A لا يمكن بأي حالٍ أن يؤثِّر على نتيجة القياس الذي يُجرى على B، والعكس بالعكس (وهو الافتراض الذي افترضه كذلك أينشتاين وبودولسكي وروزين). ونفترض في الثاني أن إعدادات الجهاز الذي نستخدمه لإجراء القياس على A لا يمكن أن يؤثِّر بأي حالٍ على نتيجة القياس الذي يُجرى على B، والعكس بالعكس.

يوضح الانتهاك التجريبي للا متساوية بيل أن أحد هذين الافتراضين أو الآخر (أو كليهما) غير صحيح، إلا أن هذه التجارب لا تخبرنا أي واحد من بينهما غير الصحيح.

في ورقة بحثية نُشِرت في عام ٢٠٠٣، اختار أنتوني ليجيت المكلل بجائزة نوبل أن يستبعد فرضية الإعدادات، وهو ما يعني القبول بأن سلوك

الجسيمات ونتائج القياسات اللاحقة تتأثَّر بالطريقة التي تُعَدُّ بها أجهزة القياس، إن هذا شبحيٌّ جدًّا تمامًا، ومخالف للبداهة للغاية[1]:

«لا يشير أي شيء في خبرتنا بالفيزياء إلى أن اتجاه (أجهزة قياس) بعيدة قد تؤثِّر بشكلٍ ما في نتيجة تجربة بصورة تزيد أو تنقص عن -فلنقل- مواضع المفاتيح في جيب من يُجري التجربة أو الوقت الذي تعرضه الساعة على الحائط».

إذا احتفظنا بفرضية النتيجة، نعين فئة من نظريات المتغير الخفي اللا محلي، تمتلك فيها الجسيمات المفردة خواصًا تحددت قبل عملية القياس. يعتمد ما يقاس فعليًا على الإعدادات بالطبع، ويؤثِّر تغيير هذه الإعدادات بطريقة ما في سلوك جسيمات بعيدة (وهو السبب في كلمة «لا محلي»). أطلق ليجيت على هذه الفئة العريضة من النظريات اسم نظريات المتغير الخفي اللا محلي المُعَمَّى، وهي تمثل ملاذًا في منتصف الطريق بين المحلية الصارمة واللا محلية التامة.

ومضى ليجيت موضحًا أن استبعاد فرضية الإعدادات لا يزال غير كافٍ في حدِّ ذاته من أجل توليد كل نتائج ميكانيكا الكم. وفعل مثلما فعل بيل تمامًا في عام ١٩٦٤، اشتق لا متساوية صحيحة مع كل فئات نظريات المتغير الخفي اللا محلي المُعَمَّى إلا أنه من المتوقع أن تنتهكها ميكانيكا الكم. هكذا إذن، صار على المحك سؤالٌ بسيطٌ إلى حدٍّ ما

(١) A. J. Leggett, 'Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum Mechanics: An Incompatibility Theorem', Foundations of Physics, 33 (2003), 1469–93. This quote appears on pp. 1474–5

بخصوص ما إذا كانت الجسيمات الكمية تحظى من قبل عملية القياس بتلك الخواص التي نعزوها إليها. بعبارة أخرى، ها هنا فرصة لاختبار إذا ما كانت الجسيمات الكمية تحظى بما قد نرغب في اعتباره خواصًّا «واقعية» قبل إجراء القياس عليها.

أُعلن عن نتائج تجربة صممت من أجل اختبار لا متساوية ليجيت في عام ٢٠٠٧، وجاءت النتائج مرة أخرى لا لبْس فيها. تتطلَّب لا متساوية ليجيت في تجارب لها ترتيباتٍ محددة للإعدادات نتيجة تقل عن أو تساوي ٣,٧٧٩. تتنبَّأ ميكانيكا الكم بنتيجة ٣,٨٧٩، وهو ما يعني انتهاكًا بمقدارٍ أقل من ٣٪. جاءت نتيجة التجربة ٣,٨٥٢١، بهامش خطأ ± ٠,٠٢٢٧. لقد انتُهِكت لا متساوية ليجيت[1]. أُجريت العديد من التجارب المتنوعة مؤخرًا من أجل اختبار لا متساوية ليجيت؛ أكدت جميعها هذه النتيجة العامة.

يبدو أنه لا وجود لمؤامرة ضخمة من الطبيعة يمكن ابتكارها من أجل الإبقاء على المحلية. في عام ٢٠١١، نشر كلٌّ من ماثيو بيوزي وجوناثان باريت وتيري رودولف من كلية لندن الإمبراطورية (إمبريال كوليج في لندن) نظرية محظورات أخرى[2]. تقول في الأساس إن إضافة أي نوعٍ

---

(١) Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek, Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, and Anton Zeilinger, 'An Experimental Test of Non-local Realism', Nature, 446 (2007), 871–5.

في حالة إذا ما كنت تتساءل، انتُهكت لا متساوية بيل في هذه التجارب أيضًا.

(٢) Matthew F. Pusey, Jonathan Barrett, and Terry Rudolph, 'On the Reality of the Quantum State', Nature Physics, 8 (2012), 475–8.

من أنواع المتغيرات الخفية تُفسَّر فيه الدالة الموجية على نحو إحصائي بحت، يستحيل أن يُوَلِّد كل تنبؤات ميكانيكا الكم.

أطلقت «نظرية بيوزي وباريت ورودولف» -كما يُطلَق عليها- شرارة بعض البلبلة والكثير من الجدل عندما نُشِرت لأول مرة[1]. إذ أُنزِلت منزلة نظرية تستبعد كل أشكال التفسيرات التي تمثل فيها الدالة الموجية «مَعرِفة» وذلك لصالح تفسيرات تُعتبر فيها الدالة الموجية واقعية. إلا أن المَعرِفة هنا تُصنَّف على اعتبار أنها معرفة مستقاة من إحصاءاتٍ تتعلق بما يفترض أنه يقع من خلف الفيزياء، ويُفترض كذلك أنه واقعيٌّ موضوعيًا. إن ذلك هو ما تستبعده لصالح تفسيرات واقعية إلا أنها لا تستبعد في الوقت نفسه التفسيرات المبنية على التفسيرات اللا واقعية التي اهتممنا بها في الفصلين الخامس والسادس.

جديرٌ بالملاحظة أنه بينما تستبعد هذه التجارب كلَّ نظريات المتغيرات الخفية المحلية واللا محلية المعماة، إلا أنها تبرز بوضوحٍ شديدٍ كيف زودت التفسيرات الواقعية العلماء التجريبيين بأسبابٍ محفزة كي يشمروا أكمامهم ويدخلوا إلى المعمعة. في حالتنا هذه، حضَّ البحث عن تبصر وفهم نظريين انطلاقًا من روح الفرضية #٤ (انظر الملحق) على بعض الابتكارات التجريبية الرائعة. لقد جاءت بعض المجالات العلمية الحديثة نسبيًا للمعلوماتية الكمية والحوسبة الكمومية والتشفير الكمي جزئيًا من المجهودات التي بذلت لحل هذه

---

(١) من أجل نظرة عامة ممتازة، انظر: Matthew Saul Leifer, 'Is the Quantum State Real? :An Extended Overview of ψ–ontology Theorems', Quanta, 3 (2014), 67–155

الأسئلة التأسيسية واستكشاف ظاهرة التشابك العجيبة، مع أن البحث عن إجابات ذات مغزى لم يسفر بعد عن أي ثمارٍ.

إلا أنه علينا الآن مواجهة الاستنتاجات التي جاءت من كل الاختبارات التجريبية للا متساويتيْ بيل وليجيت. في أي تفسير واقعي، يفترض فيه أن الدالة الموجية تمثل الحالة الفيزيائية الواقعية لنظام كمي، يجب أن تكون الدالة الموجية لا محلية، ويجب أن تنتهك السببية المحلية.

حسنا، دعنا نرى ما الذي يعنيه ذلك.

* * *

الفصل الثامن

ميكانيكا الكمِّ غير مكتملة
لذلك نحتاج إلى إضافة بعض الأشياء الأخرى
الموجات الدليلية والجهود الكمية، وآليات الانهيار الفيزيائي

لم يكن أينشتاين وحيدًا في البحث عن وسائل لإعادة إدخال السببية والحتمية في تفسيرٍ واقعيٍّ لميكانيكا الكم. كان دي برولي يبحث أيضًا، وطرح في مؤتمر سولفاي الخامس في بروكسل في عام ١٩٢٧ نظريته «الحل المزدوج» double solution، متضمنة «موجات دليلية» و«موجات احتمالية». إلا أنه إذا كان دي برولي قد طمح إلى دعمٍ من أينشتاين في المؤتمر، فقد أصابه الإحباط، إذ بقي أينشتاين جامدًا بدلًا من الإعلان عن أن دي برولي يبحث في الاتجاه الصحيح.

سرعان ما تطورت نظرية دي برولي إلى نظرية موجة دليلية أكثر ألفة، تُوَجِّه فيها الدالة الموجية مسارات جسيمات واقعية فيزيائيًّا، إلا أن نقاشاتٍ أعمق (كان أبرزها مع باولي) أثارت شكوكًا في رأسه حول صحتها، وبحلول عام ١٩٢٨ تخلَّى عنها تمامًا. لم يضمها إلى منهجٍ دراسيٍّ في الميكانيكا الموجية، دَرَّسه في كلية العلوم بباريس Faculté de Sciences في عامٍ لاحقٍ، في الحقيقة، تحوَّل دي برولي نحو اعتناق مذهب كوبنهاجن.

تحفز بوم بعد لقائه مع أينشتاين في عام ١٩٥١، أعاد النظر في الأمور والتفكير بشكلٍ أعمق. وكما أوضحتُ في الفصل الرابع، كان تفسير كوبنهاجن قد ترسَّخ نظاميًا في الصياغة المعيارية لنظرية الكم من خلال بنية مسلماتها، خاصة المسلمة #١ (يمكنك النظر إلى الملحق من أجل التذكير). وبدلًا من أن يقبل بوم بذلك شكليًا، قرَّر استكشاف ما احتمالية أن تكون الصياغات الأخرى -وبالتالي التفسيرات الأخرى- جائزة من حيث المبدأ.

بدأ بإعادة العمل على معادلة شرودنجر الموجية، مفترضًا وجود جسيمٍ واقعيٍّ، يتبع مسارًا واقعيًا عبر المكان، ترتبط حركته بالموجة من خلال فرض «ظرف توجيهيٍّ» guidance condition، يحدد سرعته. يعني هذا أن حركة الجسيم محكومة بالطاقة الكامنة الكلاسيكية للنظام -انحدار التل في تشبيهي المجازي السابق الخاص بسيزيف- ومحكومة كذلك بما يُدعى الجهد الكمي، وهو غير كلاسيكي ولا محليٌّ قطعًا ومسؤولٌ وحده عن إدخال التأثيرات الكمية فيما كان ليصبح من دونه وصفًا كلاسيكيًا بالكامل.

أدرك بوم بعد ذلك بقليلٍ أنه أعاد اكتشاف نظرية الموجة الدليلية الخاصة بدي برولي، صارت هذه المقاربة معروفة الآن تحت اسمين مختلفين، نظرية دي برولي – بوم أو ميكانيكا بوم. وقد كان اهتمام بيل بهذه النظرية هو ما قاده إلى ابتكار نظريته ولا متساويته. أراد أن يعرف إذا كانت اللا محلية حتمية في أي تفسير يقوم على متغير خفي (واتضح أنها حتمية بالفعل).

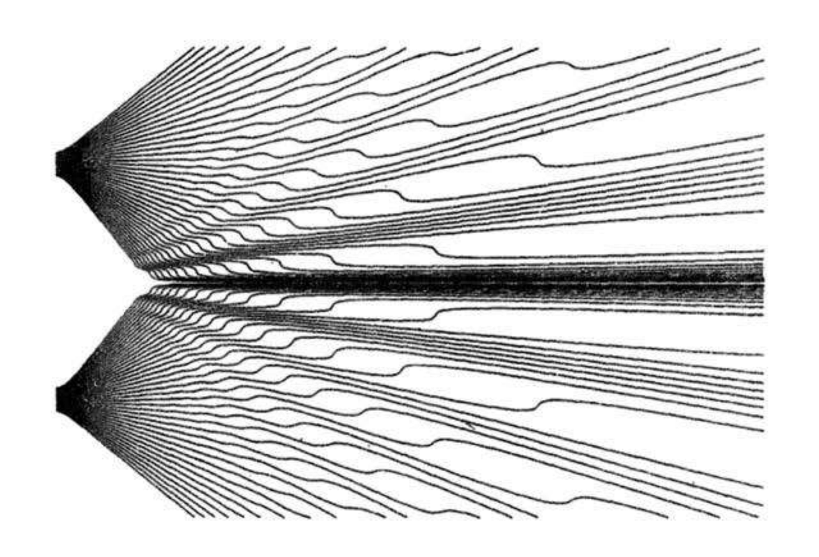
لاحظ أنه في تفسير دي برولي - بوم، تمثِّل الدالة الموجية نفسها جزءًا كبيرًا جدًّا من الواقع الموصوف - ليست وسيلة مناسبة ببساطة لجمع السلوك الإحصائي المستقى من واقع ما خفي كامن.

نتج عن ذلك أن نظرية بيوزي وباريت ورودولف للمحظورات لم تستبعدها. ثمة نكهة إحصائية، إلا أنها لا تتعلق بالدالة الموجية بل بانتشار المواضع والسرعات الابتدائية للجسيمات الواقعية فيزيائيًّا التي يتم توجيهها عن طريقها (وهي المواضع والسرعات العشوائية على الأرجح).

تحدد هذه الظروف الابتدائية المسارات التي سوف تتبعها الجسيمات فيما يلي، يعطي التوزيع الإحصائي للظروف الابتدائية توزيعًا إحصائيًّا بخصوص المسارات المتاحة.

تلاشى اهتمام بوم بالنظرية، إلا أن حماس باسل هيلي -زميله في كلية بيرلبيك بلندن- وعمل باحثين شابين كريس ديودني وكريس فيليبيديس بعثاها من جديدٍ. قد تكون الرؤية هي التصديق أحيانًا، وعندما استخدم ديودني نظرية دي برولي - بوم لحساب مسارات الإلكترونات الافتراضية في تجربة الشقَّين (انظر شكل رقم ١٥)، استثارت الصورة الناتجة شهقات ذهول. يمرُّ كلُّ إلكترون في هذه المحاكاة خلال أحد الثقبين أو الآخر، يتبع أحد المسارات سابقة التحديد، يوجهه الجهد الكمي ويُرصد في هيئة بقعة مضيئة على الشاشة. مع مرور المزيد من الإلكترونات عبر الجهاز، تعني الاختلافات في ظروفها الابتدائية أنها تمرُّ منفردة عبر شقَّين مختلفين وتتبع مسارات مختلفة. تتخذ النتيجة

النهائية هيئة نمطٍ من البقع على الشاشة، تعكس مجموع المسارات المتنوعة - وهو ما نفسره على أنه نمط تداخل الشقين.



شكل رقم ١٥ مسارات الجسيم في تجربة الشقين كما تتنبَّأ بها نظرية دي برولي - بوم

يمكننا الاقتراب بعض الشيء من فهم الكيفية التي قد يحدث بها هذا عن طريق بعض التجارب الحديثة والمبهرة إلى حدٍّ كبيرٍ. أعلن جون بوش وزملاؤه في معهد ماساشوستس للتكنولوجيا عن تجارب ترتدُّ فيها قطرة زيت صغيرة عن سطحِ سائلٍ[١]. يخلق كلُّ ارتداد مجموعة من التموجات في السائل، تتراكب التموجات وتتداخل، يُوَجِّه نمط

(١) انظر على سبيل المثال: Guiseppe Pucci, Daniel M. Harris, Luiz M. Faria, and John W. M. Bush, 'Walking Droplets Interacting with Single and Double Slits', Journal of Fluid Mechanics, 835 (2018), 1136–56.

التداخل الناتج حركة القطرة اللاحقة. عندما تمر التموجات عبر فتحتين متجاورتين في حاجز، تُوَلِّد نمط تداخل الشقين المألوف (مع ذلك فثمة بعض الشكوك الآن بخصوص هذا)(١). عقب ذلك تمر القطرة «السائرة» عبر إحدى الفتحتين أو الأخرى، توجهها التموجات نحو وجهتها. على الرغم من أن هذه التجربة كلاسيكية تمامًا، فإن ثمة من يذهب إلى أن هذه الحركات تحاكي أنواع السلوك التي قد نتوقعها استنادًا إلى نظرية دي برولي - بوم، إذ يُستَبدل بقطرة الزيت فيها جسيمٌ كمي واقعي.

إلا أن مثل هذه التجارب الكلاسيكية لا يمكن أن تحاكي الجهد الكمي الذي يكشف عن بعض السلوكيات الخاصة جدًّا، نظرًا إلى طبيعته. ومن أجل استكشاف ذلك، دعنا نعود مرة أخرى إلى نظامنا الكمي المفضل المكون من جسيمات مُعَدَّة في تراكب كمي لحالتي اللف المغزلي ↓ ↑و. نمرِّر هذه الجسيمات بحيث يمر جسيمٌ في كل مرة بين قطبي مغناطيس. في نظرية دي برولي - بوم ينقسم الجهد الكمي بسبب وجود المجال المغناطيسي إلى جزأين متساويين لكنهما غير متداخلين. يوجِّه أحدهما هذه الجسيمات إلى أعلى، وسوف تُوَلِّد الجسيمات التي تتبع هذا المسار النتيجة ↑. يوجِّه الآخر الجسيمات إلى الأسفل، لتعطي النتيجة ↓. تعتمد النتيجة التي نحصل عليها على الظروف الابتدائية لكل جسيمٍ، إلا أنه إذا تبع جسيمٌ المسار العلوي،

(١) انظر: Natalie Wolchover, 'Famous Experiment Dooms Alternative to Quantum Weirdness', Quanta Magazine, 11 October 2018: https:// www.quantamagazine.org/famous-experiment-dooms-pilotwave-alternative-to-quantum-weirdness-20181011/.

لا يختفي الجهد الكمي للمسار السفلي، بدلًا من ذلك يواصل الوجود على هيئة «موجة فارغة» empty wave.

علينا افتراض أن الجسيم الذي يتبع المسار العلوي بين قطبي المغناطيس يتفاعل مع جهازٍ للرصد من نوعٍ ما. وعلى الرغم من الأبعاد الكلاسيكية للجهاز فإننا نقرُّ مرة أخرى بأنه مكونٌ من كياناتٍ كميَّة، وأن أولى مراحل التفاعل بين الجسيم وجهاز الرصد ذات طبيعة كمية. يستتبع ذلك فك الارتباط، إلا أننا لا نقصد به الأداة الرياضية المناسبة المصمَّمة من أجل محو حدود التداخل من احتمالية مسبقة، كما في تفسير تواريخ فك الارتباط. إن الجهد الكمي هو موجة فعلية أو مجال فعلي في نظرية دي برولي – بوم، ولذلك فإنه يحتاج إلى فك الارتباط من أجل أن يكون آلية فيزيائية واقعية. سوف نتعرض لهذا بالتفصيل في هذا الفصل.

في نظرية دي برولي – بوم، لا تنهار الدالة الموجية فيزيائيًّا في جميع أنحاء المكان، تواصل «الموجات الفارغة» البقاء، إلا أنها لم تعد ذات صلة بالقياس أو بالتغيير اللاحق في معرفتنا بالنظام. وتعني عملية التضخم غير الانعكاسية من النطاق الكمي إلى النطاقات الكلاسيكية المعقدة أن نتيجة القياس قد تحدَّدت قبل وقتٍ طويلٍ من وصولنا إلى قطة شرودنجر.

هذا جيدٌ جدًّا، إلا أنَّ لمثل هذه التفسيرات السببية ثمنًا كما رأينا من قبل، يرتبط هذا التفسير بتزايد الموجات الفارغة. مما لا شكَّ فيه أننا إذا عثرنا على دليلٍ تجريبي بخصوص وجود الموجات الفارغة، فسوف يوفر ذلك دعمًا مهولًا للنظرية. إلا أننا –للأسف– لا نحصل على معرفتنا

بالدالة الموجية إلا من خلال القياسات التي نجريها على الجسيمات التي توجهها، وهذه الموجات الفارغة -من حيث التعريف- لا ترتبط بأي جسيمات - إنها فارغة.

لم ننتهِ تمامًا بعد، دعنا نعود مرة أخرى إلى تجربة أينشتاين وبودولسكي وروزين، التي تتضمَّن ذرتين متشابكتين A وB - تشكَّلتا في حالتي لف مغزلي متعاكستين ↓ ↑و. يتطلَّب حفظ الزخم الزاوي تحاذي اللفين بحيث إذا كان لكلا المغناطيسين الاتجاه نفسه (٠° - انظر شكل رقم ١٣)، فإن نتيجتي القياس هما A↑B↓ وA↓B↑.

افترض أنَّ الذرة A تحرَّكت إلى اليسار وعبرت بين قطبي مغناطيس، ضُبِط اتجاهه عند ٠°، نسجل النتيجة ↑. وبحسب نظرية دي برولي - بوم يؤدي فعل القياس هذا على الذرة A إلى تأثيرات لحظية في الجهد الكمي، ويُبذَل نوعٌ من أنواع «العزم» الكمي اللا محلي على الذرة B. يؤسس هذا الحدث للف المغزلي للذرة B وبذلك سوف تُرصَد في حالة ↓. كتب المُنَظِّر بيتر هولاند[1]:

«يستقطب فعل القياس على الذرة A الذرة B (في اتجاه المجال التحليلي العامل على A) وسوف تأتي نتائج أي قياسٍ لاحقٍ على B على النحو الذي تتنبَّأ به نظرية الكم».

نرى من فورنا أن اللا محلية تفرض بالفعل تأثيرًا عن بُعدٍ في هذا

---

(١) Peter R. Holland, The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993), p. 475.

التفسير: «يُعتنق التأثير الشبحي عن بعد على أنه حقيقة حياتية من البداية، وبالتالي تُجتنب أي احتمالية للصدام مع المحتوى التجريبي لميكانيكا الكم»[1].

نراقب صخرة سيزيف بينما تتدحرج نحو سفح التل، تصل إلى أسفله، حيث لم تعد حركتها تحت تأثير الانحدار (طاقة الوضع الكلاسيكية). لو لم يكن هناك شيء في الطريق، وقد نفترض عدم وجود احتكاك يبطئ الصخرة، تتدحرج الصخرة عبر الوادي في خطٍّ مستقيمٍ بسرعة ثابتة وفق قانون نيوتن الأول للحركة. إلا أنه على الرغم من تسطُّح الوادي، فإن الجهد الكمي لا يختفي بالضرورة هنا بحسب نظرية دي برولي – بوم. لا تزال حركة الصخرة معرَّضة لبعض التأثيرات الشبحية اللا محلية، ولا ينطبق عليها قانون نيوتن الأول. افترض أن شريكتها المتشابكة معها تمر عبر جهاز للقياس موضوع في الوادي المجاور، ما يتسبَّب في تموجات عبر الجهد الكمي. تخيل مشاهدتك للصخرة الأولى تتدحرج على طول الوادي، عندما تصطدم بلا سببٍ ظاهرٍ بعزم كمي خفي، يغيِّر سرعتها واتجاهها.

تستعيد نظرية دي برولي – بوم السببية والحتمية، تتخلص من الحاجة إلى استحضار انهيارٍ للدالة الموجية، إلا أن ذلك يأتي على حساب القبول بتأثيرٍ شبحيٍّ لا محلي عن بعد. ومن دون شك، يتعارض هذا بالتأكيد مع روح نظرية أينشتاين النسبية الخاصة، إلا أن المدافعين عن هذا التصور يذهبون إلى أن انتقال المعلومات بسرعة تفوق سرعة الضوء –الأمر

(1) Ibid., p. 462.

الذي تفرضه النظرية- لا يمكن استخلاصه من أي تجربة، تتسق مع نظرية الكم. يتراسل الجسيمان A وB أحدهما مع الآخر عبر مسافاتٍ شاسعة حقًّا عن طريق بذل أحدهما تأثيرات في الآخر عبر الجهد الكمي، إلا أن هذا لا يفيد في شيء. من هذا المنظور، يمكن أن تتعايش نظريتا دي برولي – بوم والنسبية الخاصة لأينشتاين، ولو بصعوبة.

لذلك لم يكن من المفاجئ ألا يُفتن أينشتاين بالمقاربة التي اتخذها بوم، كتب في خطاب إلى بورن(١):

«هل لاحظتَ أن بوم يعتقد في قدرته على تفسير نظرية الكم من منظورٍ حتمي (وهو الأمر الذي اعتقد فيه دي برولي قبل ٢٥ عام)؟ إنها وسيلة تبدو لي رخيصة للغاية».

تحتفظ نظرية دي برولي – بوم اليوم بعددٍ قليلٍ من الأتباع داخل المجتمعات المعنية بالفيزياء والفلسفة، وعلى الرغم من شدة إخلاصهم، فإنها تبقى بالتأكيد خارج التيار الرئيسي لميكانيكا الكم، وتظهر في القليل من الكتب حول الموضوع. إنها مكافئة لميكانيكا الكم من كل وجه، ومع ذلك تسمح بتفسيرٍ مختلفٍ اختلافًا جذريًّا للأحداث التي تقع على المستوى الكمي، وهو تفسيرٌ يتناغم بصورة أكبر كثيرًا مع تصوراتنا

(١) Albert Einstein, letter to Max Born, 12 May 1952. Quoted in John S. Bell, Proceedings of the Symposium on Frontier Problems in High Energy Physics, Pisa, June 1976, pp. 33–45. This paper is reproduced in J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987), pp. 81–92. The quote appears on p. 91.

البدهية الميتافيزيقية المسبقة بخصوص الطريقة التي قد يعمل الواقع وفقها.

ذهبوا إلى أن السبب وراء تدريس الصيغة الميكانيكية الكمية المعيارية، لا نظرية دي برولي - بوم يكمن في صدفة تاريخية[1].

من يستطيع أن يقول ما الذي كان ليحدث لو أن دي برولي لم يذعن في عام ١٩٢٧ وكانت قبضة مذهب كوبنهاجن أقل حزمًا؟ هل كان شكلٌ ما من أشكال نظريات الموجة الدليلية ليصبح التفسير المعياري الاعتيادي؟ إنه جدلٌ يحمل قدرًا كبيرًا من الإزعاج لأي أحد، يتبنَّى منظورًا مثاليًّا للكيفية التي يتقدم بها العلم. إنه مزعجٌ لأن الاختيار بين التفسيرات المتكافئة المتنافسة في نديَّة لإحدى أهم نظريات الفيزياء التأسيسية جاء ببساطة نتيجة الترتيب الذي سارت به الأمور بدلًا من أن ينبني على حججٍ مقنعة، تتأسَّس على مفاهيم الحقيقة أو القدرة على التفسير.

كتب بيل في عام ١٩٨٢ [2]:

«لماذا يتجاهلون صورة الموجة الدليلية في الكتب المرجعية؟ ألا يجب تدريسها، لا بوصفها الوسيلة الوحيدة، بل على أنها ترياقٌ للرضا السائد؟ كي يظهر أن الغموض والذاتية والافتقار إلى الحتمية، لا تفرضها علينا حقائق تجريبية، بل اختيار نظري متعمد؟».

---

(١) انظر: James T. Cushing, Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony (University of Chicago Press, Chicago, 1994).

(٢) J. S. Bell, 'On the Impossible Pilot Wave', Foundations of Physics, 12 (1982), 989–99. This paper is reproduced in Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, pp. 159–68.

صدقًا، لستُ متأكدًا. على مرِّ العصور، اعتاد العلم على نزع العناصر الميتافيزيقية غير الضرورية وغير ذات الصلة من النظريات التي يمكن التبين من أنها تعمل بكفاءة من دونها. تتضمن الأمثلة أفلاك التدوير[١] والفلوجبستون[٢] والأثير[٣] والكالوري، المادة التي ظنُّوا يومًا مسؤوليتها عن ظاهرة الحرارة. حتى لو ترسخت نظرية مثل نظرية دي برولي – بوم باعتبارها التفسير المفضَّل في عام ١٩٢٧، أظن أنه من الصعوبة بالفعل أن تواصل الوجود في هذا الشكل. كان الفيزيائيون النفعيون يتخلَّصون من عناصر النظرية الزائدة سريعًا، بغية إجراء حساباتٍ أكثر فعالية، إذ إنهم لا ينشغلون كثيرًا بالسببية والحتمية، كما أنهم أقل هوسًا بالتفسير والمعنى.

إذا مِلنا إلى موافقة أينشتاين وتخلينا عن هذه المقاربة على اعتبار أنها «رخيصة للغاية»، إذن علينا التسليم بأن الاختيارات نفدت منَّا. يعني هذا الموقف التخلي عن كل صور نظريات المتغيرات الخفية، سواء كانت محلية أو لا محلية مُعمَّاة أو لا محلية بحتة. إذا كنَّا لا نزال نرغب في الاستمرار في الإصرار على تفسيرٍ واقعي للدالة الموجية، إذن علينا قبول أننا الآن صرنا في ورطة.

---

(١) أفلاك التدوير، كانت وسيلة لتفسير حركة الكواكب المرصودة في نموذج بطليموس الذي ذهب إلى مركزية الأرض، إذ ذهب إلى أن هذه الكواكب تدور على محيط دائرة يدور مركزها في مدار حول الأرض. (المترجم).

(٢) ذهبت النظرية إلى أن المواد المحترقة يجب أن تكون غنية بالفلوجيستون، وأنه يتحرَّر منها عند احتراقها. (المترجم).

(٣) وسط ظنُّوا أنه يملأ الكون وفيه تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية. (المترجم).

ليس أمامنا خيارٌ سوى محاولة التركيز على أحد ألغاز ميكانيكا الكم العنيدة والأمل في حلِّها عن طريق إضافة مكون فيزيائي آخر إلى الصياغة، من ثم قد توفِّر حتى أكثر النجاحات تواضعًا بعضَ الأدلة بخصوص حل بعض الألغاز الأخرى.

ننظر مرة أخرى إلى الصياغة ونحاول تعيين بعض مواضع الضعف فيها، نقطة نهجم منها. نجد مرة أخرى أن الموضع الذي يبدو أن علينا توجيه انتباهنا نحوه هو عملية القياس الكمي وانهيار الدالة الموجية و«الانقسام الخادع» المفترض بين العالميْن الكمي والكلاسيكي. لقد لخَّص بيل بشكلٍ رائعٍ الانزعاج الذي نشعر به حيال أي تفسيرٍ واقعيٍّ لميكانيكا الكم في مقال نُشِر في عام ١٩٩٠ [١]:

«ما الذي يؤهِّل بعض الأنظمة الفيزيائية كي تلعب دور «القائم بالقياس»؟ هل كانت دالة العالَم الموجية في انتظار أن تقفز آلاف السنوات حتى يظهر مخلوقٌ حيٌّ وحيد الخلية؟ أم كان عليها الانتظار لفترة أطول قليلًا، من أجل أن يظهر نظامٌ مؤهلٌ بصورة أفضل.. يحمل درجة الدكتوراه؟».

لذلك دعنا ننظر في أمر القياس الكمي بشيء من التدقيق. فَكِّر في أمر نظام كمي يتكوَّن من عددٍ كبيرٍ من الجسيمات المتماثلة (مثل الفوتونات والإلكترونات). يطلق الفيزيائيون على مثل هذه المجموعة اسم فرقة ensemble. فكر في أن الجسيمات تعمل معًا «في تناغم»، تعزف جميعها القطعة الموسيقية نفسها تمامًا مثل فرقة من الموسيقيين.

(١) J. S. Bell, 'Against Measurement', Physics World, 3 (1990), 33.

نُعدُّ الجسيمات بحيث تمثلها جميعًا دالة موجية كلية مفردة، يمكننا كتابتها على هيئة تراكب كمي ↑و↓ ، كما في السابق. لا تزال هذه الجسيمات في حالة كمية واحدة، كل ما هناك أن هذه الحالة يمثِّلها تراكب كمي. يقال لذلك إن هذه الحالة حالة نقية pure state. نمرِّر الجسيمات عبر جهازٍ للقياس، تنهار الدالة الموجية الكلية عشوائيًّا في سلسلة من نتائج القياس. مرَّت الجسيمات كلها في النهاية عبر الجهاز (ونفترض أنها لم تتدمر خلال العملية)، نتوقع الحصول على خليطٍ من الجسيمات تتوزَّع بين الحالتين ↑و↓ بنسبة ٥٠ : ٥٠. حوَّل القياس الفرقة من حالة نقية إلى خليطٍ. أوضح فون نيومان أن مثل هذا التحوُّل يرتبط بازديادٍ في إنتروبيا النظام.

والإنتروبيا هي خاصية من خواص الديناميكا الحرارية، نميل إلى تفسيرها بصورة عامة على أنها كمية «الفوضى» في نظام. على سبيل المثال، عندما يذوب قالب ثلجٍ، يتحوَّل إلى صورة سائلة أكثر فوضوية، وعندما يسخن الماء إلى بخار، يتحول إلى صورة غازية أكثر فوضوية؛ تزداد إنتروبيا الماء عندما يتحوَّل من الحالة الصلبة إلى السائلة إلى الغازية.

يدَّعي القانون الثاني للديناميكا الحرارية أن الإنتروبيا تزداد دائمًا في تغير تلقائي. إذا نظرنا في أمر مادة مثل هواء، محصور في نظام مغلق، محروم من تبادل الطاقة مع العالم الخارجي، فسوف تزداد الإنتروبيا الخاصة به تلقائيًّا وحتميًّا حتى أقصى ما يمكن بينما يقترب من التوازن مع المحيط الخاص به. يبدو من الواضح بداهة أن جزيئات الأكسجين

والنيتروجين وذرات الغازات الخاملة النادرة التي تشكِّل الهواء لن تحتشد جميعها معًا في أحد أركان الحجرة التي أكتب فيها هذه الكلمات. بدلًا من ذلك، ينتشر الهواء كي يؤثر بضغط متجانس معقول (حمدًا لله). هذه هي حالة الإنتروبيا القصوى.

يربط القانون الثاني الإنتروبيا «بسهم الزمن»، يبدو أننا مجبرون على تتبُّع الزمن في اتجاه واحد – نحو الأمام، رغم قدرته على التحرك بحرية في الأبعاد المكانية الثلاثة – الأمام والخلف، اليمين واليسار، الأعلى والأسفل. افرض أننا نشاهد فيديو صُوِّر خلال حفل مشروبات حديث، نشاهد كوبَ كوكتيل مهشَّمًا، يعيد تجميع نفسه تلقائيًّا من فوق الأرضية الخشبية، ويمتلئ من جديد بالشراب السنغافوري، ويطير عاليًا خلال الهواء كي يعود بين أصابع الضيف، نستنتج سريعًا أن هذا الانعكاس للقانون الثاني للديناميكا الحرارية يدل على أن الفيديو يُعرض للخلف في الزمن.

يبدو أن القياس الكمي الذي يحوِّل حالة نقية إلى خليط، يرتبط بصورة وثيقة بالإنتروبيا وبالتالي يرتبط بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية. لا يحتاج الأمر إلا إلى خطوة صغيرة من هنا إلى سهم الزمن ومفهوم اللا انعكاسية. مثلما لا يعود كوب الشراب إلى تجميع نفسه في أي وقتٍ قريبٍ، لا نتوقع أن يُعاد تجميع حالتي الكم ↑و↓ تلقائيًّا في تراكب كمي.

أدرك بور أهمية «التأثير اللا انعكاسي» للقياس في الربط بين العالمين الكمي والكلاسيكي. كتب ويلر عن «التأثير اللا انعكاسي للتضخيم».

تتمثَّل الحقيقة الواضحة في أننا نحصل على المعلومات بخصوص العالم الكمي عندما نستطيع تضخيم الأحداث الكمية الأولية وتحويلها إلى إشاراتٍ قابلة للإدراك، على غرار انحراف مؤشر عداد. ربما يكون المكان المنطقي للبحث عن انهيارٍ فيزيائي (طبيعي) للدالة الموجية هنا، خلال هذا التأثير. من ثم توفر علينا قطة شرودنجر إزعاج أن تكون ميتة وحية معًا، لأن تأثير التضخيم المرتبط بتسجيل عداد جايجر لانبعاث إشعاعي قد تسبب في إقرار الوضع بالفعل، بطريقة ما أو الأخرى. كان الفيزيائي ديتر زيه أول من لاحظ أن التفاعل بين الدالة الموجية وبين جهاز القياس وبيئته يؤدي إلى فصلٍ سريعٍ وغير قابل للانعكاس للمكونات الموجودة في حالة تراكب كمي، على نحو يثبط حدود التداخل. هذا هو فك الارتباط الذي التقيناه لأول مرة في الفصل السادس، إلا أننا نحتاج إليه مرة أخرى كي يعمل من منظورٍ فيزيائي واقعي، إذ نرغب في تطبيقه على دالة موجية واقعية.

دعنا نتوقف ونفكر كيف من المفترض أن يعمل. كما رأينا، تؤدي الخطوة الأولى في تفاعل القياس إلى تشابك ذلك الذي يقوم بالقياس -مهما كان- داخل الدالة الموجية الكلية. يستتبع هذا تفاعل آخر، ثم آخر، فآخر. قد نفترض استمرار هذا التسلسل حتى يتشابك جهاز القياس الكلاسيكي تمامًا داخل الدالة الموجية الكلية، ما يؤدي إلى إمكانية تراكب الأشياء التي لها حجوم كلاسيكية والتداخل فيما بينها – تلك الأشياء على غرار مؤشر قياس في اتجاهين مختلفين في الوقت نفسه، أو قطة حية وميتة معًا في الوقت نفسه. يستلزم هذا أن يكون التشابك بين جهاز القياس الكلاسيكي والنظام الكمي مترابطًا تمامًا.

إلا أن ثمة بعض الاستثناءات بالتأكيد، وسوف أتعرض لها فيما يلي. لا نرى أبدًا تراكبًا للأشياء الكلاسيكية، إذ إنه عندما يصبح تسلسل التفاعلات معقَّدًا أكثر فأكثر، يُفقَد سريعًا الترابط اللازم لحفظ سلامة حدود التداخل. تتبدد حدود التداخل بالضرورة، وتستقر الدالة الموجية عشوائيًّا على نتيجة ما أو الأخرى. وهو أمرٌ غير قابل للانعكاس على الأصعدة كافة. لا تنهار الدالة الموجية تلقائيًّا في هذا السيناريو، ومن الواضح أن الزمن اللازم لهذا النوع من فك الارتباط كي تظهر آثاره يرتبط بحجم النظام المدروس وبعدد الجسيمات في الجهاز وبالمحيط الذي تتفاعل معه. كلما قل «زمن فك الارتباط»، فقدت الدالة الموجية ترابطها مع الجهاز ومع محيطها بصورة أسرع، وتطورت إلى ما ندركه على هيئة نظام كلاسيكي.

دعنا نُعَبِّر عن هذا من خلال مثال. من المقدر أن يكون زمن فك ارتباط جزيء كبير، نصف قطره واحد من مليون (١٠^-٦) من السنتيمتر تقريبًا يتحرك خلال الهواء، في حدود واحد من مليون من تريليون من تريليون من الثانية (١٠^-٣٠)[1]. يعني هذا أن الجزيء يصير «كلاسيكيًّا» في خلال وقتٍ قصيرٍ بدرجة لا يمكن تصورها. إذا تخلَّصنا من الهواء وراقبنا الجزيء في الفراغ في المعمل، نقلل عدد التفاعلات المحتملة وبذلك قد نزيد من زمن فك الارتباط المقدَّر إلى (١٠^-١٧) ثانية، وهو الرقم الذي أصبح كبيرًا كفاية كي يمكن تصوُّره (ومن الممكن قياسه كذلك). إذا وضعنا الجزيء في الفضاء بين المجرات حيث لا يتعرض

(١) مصدر هذه التقديرات: Roland Omnès, The Interpretation of Quantum Mechanics (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994). The original calculations were reported in E. Joos and H. D. Zeh, Zeitschrift für Physik, B59 (1985), 223–43.

إلا للفوتونات التي تشكل إشعاع الخلفية الكوني الميكروني، يزداد زمن فك الارتباط المقدَّر إلى (١٠^١٢) ثانية، وهو ما يعني أن الجزيء قد يبقى في هيئة نظام كمي (على سبيل المثال، في حالة تراكب) لما يقل قليلًا عن ٣٢,٠٠٠ ألف عام.

وفي المقابل، يقدر زمن فك الارتباط لذرة تراب نصف قطرها واحد من ألف من السنتيمتر -أكبر ألف مرة من الجزيء- بميكروثانية (١٠^-٦ ثانية)، حتى لو كانت في الفضاء بين المجرات. تتصرف ذرة الغبار كلاسيكيًّا حتى هناك، حيث عدد التفاعلات المحتملة مع المحيط أقل ما يمكن.

من الواضح أن أزمان فك ارتباط الكيانات الكمية مثل الفوتونات والإلكترونات والذرات المنفردة سوف يكون أطول في كل البيئات المفترضة. إلا أن الأمر عندما يتضمن أعدادًا أكبر من الجسيمات المتفاعلة كما في حالة تفاعل الأنظمة الكمية مع جهاز قياس كلاسيكي ومحيطه يصبح زمن فك الارتباط قصيرًا للغاية، ولجميع الأغراض العملية يمكننا افتراض أن الانتقال من السلوك الكمي إلى الكلاسيكي قد حدث لحظيًّا في الأساس وبصورة لا انعكاسية.

يطرح هذا النوع من الجداول الزمنية لتوقعات ما يستغرقه حدوث فك الارتباط أنه من العسير جدًّا القبض على نظام كمي خلال عملية فقدان الارتباط في أي تجربة معتادة - إلا أن ذلك قد لا يكون مستحيلًا. مع ذلك، تذكر أن هذه واحدة من المرات التي يشكِّل فيها الحجم فارقًا بالفعل. من المحتمل العثور على أنظمة في نطاق الأحجام المتوسطة، بين تلك الكمية والكلاسيكية، لها أزمنة فك ارتباط تُقاس في نطاق

الميكروثانية إلى الميللي ثانية. لقد رُصِد فك الارتباط مباشرة في أنظمة تتضمن أيونات بريليوم محبوسة، وذرات روبيديوم مستثارة بشدة، تقبع داخل فجوات ممتلئة بفوتونات ميكرونية[١]. إذا لم يُسمَح لفك الارتباط بالتقدُّم بعيدًا، من الممكن عكس العملية ومشاهدة الدالة الموجية الابتدائية وهي تتعافى عن طريق إعادة الارتباط[٢].

عُرِضت تأثيرات الحيود والتداخل ضمن نطاقات حجمية متوسطة باستخدام جزيئات في قفصٍ مغلقٍ، تتركب من ٦٠ ذرة كربون (تُدعى بوكمينستر فوليرين) و٧٠ ذرة كربون (فوليرين)، ومؤخرًا عُرِضت التأثيرات باستخدام جزيئات عضوية كبيرة تحتوي حتى ٤٣٠ ذرة[٣].

---

(١) من أجل بعض الأمثلة، انظر: Serge Haroche, 'Entanglement, Decoherence and the Quantum/Classical Boundary', Physics Today, July 1998, 36–42.

(٢) Frédéric Bouchard, Jérémie Harris, Harjaspreet Mand, Nicolas Bent, Enrico Santamato, Robert W. Boyd, and Ebrahim Karimi, 'Observation of Quantum Recoherence of Photons by Spatial Propagation', Nature Scientific Reports (2015), 5:15330.

(٣) Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw, and Anton Zeilinger, 'Wave-particle Duality of C60 molecules', Nature, 401 (1999), 680–2; Markus Arndt, Olaf Nairz, J. Petschinka, and Anton Zeilinger, 'High Contrast Interference with C60 and C70 ', Comptes Rendus de l'Académie des Sciences—Series IV—Physics, 2 (2001), 581–5; and Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger, Mathias Tomandl, Stefan Nimmrichter, Klaus Hornberger, Paul J. Fagan, Jens Tüxen, Marcel Mayor, and Markus Arndt, 'Quantum Interference of Large Organic Molecules', Nature Communications (2011), 2:263.

إن التشبيهات والمجازات بلا نهاية. إن النسبة بين قطر جزيء كربون مكون من ٦٠ ذرة والمسافات بين شبكة نيتريد السيليكون المستخدمة لرصد نمط الحيود يمكن مقارنتها بالنسبة بين قطر كرة القدم المعتادة وعرض المرمى (بحسب معايير الفيفا)، وهو ما يضفي معنى جديدًا تمامًا على عبارة «يلفها زي بيكهام».

رُصِد التداخل بين حالتين في تجارب أُجريت على ما يدعى أجهزة التداخل الكمي فائقة التوصيل (SQUID)، تضمنت بليونَ زوجٍ من الإلكترونات التي تتحرك في اتجاهين متعاكسين حول حلقة فائقة التوصيل وكبيرة كفاية كي تُرى بالعين المجردة(١). وصفوا مثل هذه الأنظمة أنها المكافئ المعملي لحالتي قطة شرودنجر.

توضح هذه التجارب أن ما ظننا إلى الآن أنه انهيارٌ للدالة الموجية ليس تجريدًا فلسفيًّا أو رياضيًّا من نوعٍ ما، بل عملية فيزيائية واقعية يمكن رصدها وتعيين قدرها. توضح كذلك الأحجام التي علينا الوصول إليها من أجل اجتناب التعرض لمحيطٍ يؤدي إلى فكٍّ سريعٍ للارتباط في الغالب.

قد نتساءل بعدئذٍ، إذا كان الارتباط الكمي هشًّا جدًّا بالفعل ومن الصعب الإبقاء عليه فكيف يمكننا بشكلٍ روتيني رصد تأثيرات التداخل التي تتطلب تراكبات كمية مترابطة للعديد من الفوتونات؟ تكمن الإجابة في أن التفاعلات التي تحدث في مجال كهرومغناطيسي يتضمن عددًا كبيرًا من الفوتونات هي في الأصل تفاعلات فوتونية - فوتونية. قد تحدث مثل هذه التفاعلات، إلا أنها ضعيفة للغاية. لا تتفاعل الفوتونات مع نفسها على الإطلاق تقريبًا، لذلك لا تمثِّل مصدرًا مؤثرًا لفك الارتباط

---

(١) انظر على سبيل المثال: Jonathan R. Friedman, Vijay Patel, W. Chen, S. K. Tolpygo, and J. E. Lukens, 'Quantum Superposition of Distinct Macroscopic States', Nature, 406 (2000), 43–6, and Caspar H. van der Wal, A. C. J. ter Haar, F. K. Wilhelm, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans, T. P. Orlando, Seth Lloyd, and J .E. Moonij, 'Quantum Superposition of Macroscopic-Persistent States', Science, 290 (2000), 773–7.

في مجال كهرومغناطيسي قوي، يستمر الارتباط، ومن الممكن رصد التداخل في نطاق الحجوم الكبيرة بسهولة.

هذه هي المرة الأولى التي نشعر فيها بتقدُّمٍ فعلي. يجب أن يحل تفسير فيزيائي لانهيار الدالة الموجية معضلة القياس الكمي بالتأكيد. وإذا كان الانهيار شيئًا فيزيائيًا واقعيًا، إذن يجب أن يعني هذا أن الدالة الموجية نفسها واقعية كذلك بالتأكيد. كيف لا يكون الأمر على هذه الصورة؟ يجب أن يكون ثمة شيءٌ فيزيائي من أجل فك الارتباط.

مع ذلك، يلزم الآن أن يكون قد اتضح أن ميكانيكا الكم لا تكافئ من يأخذه الحماس بعيدًا للغاية. لا يحل فكُّ الارتباط معضلة القياس، للأسف، إذ ذهب بيل إلى أن[1]:

«فكرة التخلُّص من الارتباط -بطريقة ما أو الأخرى- تشيع جدًّا بين من يحلون معضلة القياس، إلا أنها تستلزم إحلال «أو» محل «و»، وهو الأمر الذي يصيبني دائمًا بالارتباك».

يثبط فك الارتباط حدودَ التداخل عن طريق تخفيفها على عددٍ ضخمٍ من الحالات في جهاز القياس ومحيطه. يمكننا الذهاب إلى أن القياس الناشئ يفرض «أساسًا مفضلًا»، وهو أساس يتوافق بالضرورة مع الطريقة التي أُعِدّ القياس وفقها وبالتالي يتوافق مع خبرتنا الكلاسيكية. نجري القياس ونسجِّل أن الجسيم كان إما ↑ وإما ↓، لأن هذه هو ما أُعِدّ الجهاز ليقيسه، ولذلك فإن هذه النتائج ليست عرضة لتأثيرات فك الارتباط. لا يمكن لفك الارتباط بوصفه آلية فيزيائية أن يفرض اختيارًا من بين كل

---

(١) Bell, 'Against Measurement', 33.

احتمالات القياس المختلفة. لذلك يبقى حصولنا العشوائي على ↑ أو ↓ أمرًا ملغزًا بالضرورة. لا يمكن لفك الارتباط تفسير الاحتمالية الكمية، لا يمكنه تحويل ↑ و↓، إلى ↑ أو ↓.

سجَّل الفيزيائي الرياضي روجر بنروز ملحوظات مشابهة(١):

«لا يساعدنا (فك الارتباط) على تحديد ما إذا كانت القطة حية بالفعل أم ميتة... نحتاج إلى ما هو أكثر... ما نفتقر إليه شيئًا أدعوه OR، وهو اختصار يشير إلى الاختزال الموضوعي Objective Reduction. إنه شيء موضوعي - يحدث أحد الشيئين أو الآخر موضوعيًّا، إنها نظرية مفتقدة، إن OR اختصارٌ لطيفٌ لأنه يشير كذلك إلى «أو» or، وهو ما يحدث حقًّا، واحد أو OR الآخر».

أطلق المُنَظِّر رولاند أومنيس على هذه المعضلة اسم «التموضع» objectification. وهي تبقى بلا حلٍّ في سياق فك الارتباط.

حسنًا، ذلك محبطٌ قليلًا. لكن ماذا بخصوص تأثيرات الرصد التجريبي لفك الارتباط على واقعية الدالة الموجية؟ هل يمكننا الحصول على بعض العزاء على الأقل من هذا؟

لا، للأسف. إن فكَّ الارتباط آلية مهمة حقًّا، إلا أنها ليست في حدِّ ذاتها تفسيرًا منفصلًا لميكانيكا الكم. في الحقيقة، هي آلية توظَّف على النحو الأكثر نفعًا داخل تفسير من أجل فهم «الانقسام الخادع» بين

---

(١) Roger Penrose, The Large, the Small and the Human Mind, Canto edition (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000), p. 82.

لاحظ أنه يُشار أحيانًا إلى انهيار الدالة الموجية باعتباره «اختزال» الدالة الموجية.

النطاقين الكمي والكلاسيكي، كما رأينا بالفعل في حالة تفسير التواريخ المتسقة أو تواريخ فك الارتباط. وهكذا هي مستقرة بالدرجة نفسها في تفسيرات الواقعيين واللا واقعيين.

دعني أشرح. نميل بشدة إلى استنتاج أن العملية الفيزيائية لفك الارتباط تستلزم حالة كمية واقعية فيزيائيًّا. هذا أمرٌ مفهوم، إلا أننا لا نزال في بحبوحة تامة من أمرنا كي نفترض أن فك الارتباط ينطبق على نظام نختار تمثيله من خلال دالة موجية تحمل ببساطة معلومات عن النظام الكمي. بدلًا من أن نتتبع دالة موجية فيزيائية واقعية، ونتتبع حدود تداخلها كذلك، وقد أصبحت مخفَّفة عبر سلسلة من التفاعلات المرتبطة بعملية القياس ومتزايدة التعقيد، نتتبع تطور المعلومات التي نفترض أن الدالة الموجية تحتوي عليها. ومثلما كان الحال في السابق، يعتبر حينئذٍ الاختيار المفروض بين احتمالات القياس مجرد تحديثٍ للمعلومات، لا ينطوي على أي إزعاجٍ.

قد نعتقد أن المعلومات تبدو مفهومًا مصطنعًا أو تجريديًّا كي يكون له أي تبعاتٍ فيزيائية واقعية، إلا أن التفسيرات العلائقية وتفسيرات نظرية المعلومات تتعامل مع فيزياء واقعية. كل ما هناك أنها لا تتطلَّب تفسيرًا واقعيًّا للدالة الموجية وما إلى غير ذلك. وعلاوة على ذلك، يمكننا بالسهولة نفسها تمامًا تأسيس حججنا بخصوص العلاقة بين القياس الكمي والإنتروبيا على المحتوى المعلوماتي للدالة الموجية.

في عام ١٩٤٨ طور عالِم الرياضيات والمهندس كلود شانون صورة مبكرة لنظرية معلومات، لكنها فعَّالة جدًّا. عمل شانون في معامل بيل

في نيوجيرسي، المؤسسة البحثية المرموقة لشركة التليفون والتلغراف الأمريكي (AT & T) وشركة الكهرباء الغربية Western Electric (وهي الآن شركة البحث والتطوير لألكاتل لوسنت Alcatel Lucent). كان شانون مهتمًّا بكفاءة نقل المعلومات عبر قنوات الاتصال مثل التلغراف. وجد أن المعلومات مفهومٌ يمكنه أن يحظى بما نعتبره في المعتاد خواصًّا فيزيائيًّا. والجدير بالملاحظة أن للمعلومات إنتروبيا، نعرفها اليوم باسم «إنتروبيا شانون»، وهي مكافئة من أوجه عديدة «لإنتروبيا فون نيومان» المستقاة من ميكانيكا الكم.

في عام ١٩٦١ قاد هذا المنطق أحد فيزيائيي آي بي إم IBM رولف لانداور إلى الإعلان عن أن «المعلومات فيزيائية». كان مهتمًّا على نحوٍ خاص بمعالجة المعلومات في الحاسوب، واستنتج أنه عند محو المعلومات خلال الحوسبة، يلقي بها المُعالِج (البروسيسور) فعليًّا في البيئة المحيطة، ما يضيف إلى الإنتروبيا. تؤدي الزيادة في الإنتروبيا إلى زيادة في الحرارة: تزداد سخونة البيئة المحيطة بالمعالِج. نلاحظ جميعًا عندما نجري أي حوسبة معقَّدة باستخدام الحاسوب المحمول (لابتوب) كيف تبدأ حرارة الحاسوب في الازدياد بصورة مزعجة بعد وقتٍ قصيرٍ.

تتطلَّب إفادة لانداور الشهيرة شيئًا من التفسير الحريص، لكنه يكفي الآن أن نلاحظ الصلة المباشرة بين معالجة المعلومات وبين الخواص الفيزيائية مثل الإنتروبيا ودرجة الحرارة. يبدو أن «المعلومات» ليست مفهومًا مجردًا اخترعه العقل البشري، إذ قد يكون له تبعات فيزيائية واقعية.

خلاصة القول إنه لا يمكن لرصد فك الارتباط الفيزيائي أن يؤخذ كدليلٍ على أن الدالة الموجية تمثّل حالة واقعية فيزيائيًا لنظامٍ كمي. نعم، ثمة شيء فيزيائي يُفَك ارتباطه، إلا أن التفسيرات القائمة على المعلومات تعمل بالكفاءة نفسها تمامًا.

يوفِّر فك الارتباط أساسًا فيزيائيًّا لفهم الانتقال بين العالمين الكمي والكلاسيكي، إلا أنه يقوم بذلك عن طريق الاعتماد على ميكانيكا الكم المعتادة والاستدلال بها على الأنظمة المعقدة ذات المقاييس الكبيرة. ومن هذا المنظور، فإن الشيء الوحيد الذي «يُضاف» إلى الصياغة هو تعقد، سوف يكون من دون هذه الإضافة غائبًا أو مهملًا فقط. وبالنظر إلى أننا لا نعدم حاليًّا وجود أدلة تجريبية مثبتة جيدًا بخصوص فك الارتباط، قد يبدو تجاهل النظرية في الكتب المرجعية الدراسية غريبًا[١]. تتلخص الحقيقة البسيطة في أن فك الارتباط لا يخلصنا من الحاجة إلى إطارٍ تفسيري، ومرة أخري فإن أولئك الفيزيائيين الأقل اهتمامًا بالتفسير والمعنى لا يميلون إلى إزعاج أنفسهم بالانتقال من الكمي إلى الكلاسيكي، لأنهم ببساطة لا يحتاجون إلى ذلك فعليًّا.

إلا أنه ما من شيء يمنعنا من المضي قدمًا قليلًا، بينما نستمتع بهذه الزيارة القصيرة إلى شواطئ الواقع الميتافيزيقي، لماذا لا نمد ميكانيكا الكم بآلية فيزيائية جديدة بالكامل، آلية تجتنب «الانقسام الخادع» من دون الاصطدام بمعضلة التموضع objectification؟ هذا هو ما قام به

(١) على سبيل المثال في النسخة الثانية من كتاب David J. Griffiths' المرجعي الشهير **Introduction to Quantum Mechanics, published by Cambridge University Press in 2017** ذُكِر فك الارتباط مرة واحدة فقط في هامش.

الفيزيائيون جيانكارلو جيراردي وألبرتو ريميني وتوليو ويبر في عام ١٩٨٦، وفيما بعد أدخل فيليب بيرل وآخرون على النظرية الأولى تحسينات، إلا أنه من أجل التسهيل سوف نواصل الإشارة إليها باعتبارها نظرية جيراردي وريميني وويبر[١].

اختارت نظرية جيراردي وريميني وويبر إضافة حدٍّ رياضيٍّ جديدٍ إلى الصياغة الرياضية. كان أثر الحد الجديد تعريض الدالة الموجية (المفسرة واقعيًّا) لتمركزات أو قفزات أو ضربات تلقائية عشوائية. بدلًا من أن تُترك لنفسها، كي تنزلق برشاقة عبر المكان في مسارٍ حدَّدته معادلة شرودنجر وفق المسلَّمة #٥، ينكز الدالة الموجية بين الحين والآخر المعادل الكمي لمهماز كهربي، يفرض عليها الانهيار والانكماش في نفسها مثل قنفذ مفزوع. وجد جيراردي وريميني وويبر أنهم كي يحققوا هذا بشكلٍ صحيحٍ، يحتاجون إلى إضافة ثابتيْن فيزيائيين جديدين. يشير الأول إلى «دقة التمركز»، وهو الثابت الذي يحدِّد أبعاد الدالة التي تندمج مع الدالة الموجية الكلية التي تصف التراكب الكمي، عندما «تُضرب»، يحدد تمركزًا بدقة تصل إلى ١٠$^{-٥}$ سنتيمتر تقريبًا.

يمثِّل الثابت الثاني المعدل المتوسط للتمركزات التلقائية. جعلت

---

(١) انظر: G. C. Ghirardi, A. Rimini, and T. Weber, 'Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems', Physical Review D, 34 (1986), 470–91; and P. Pearle, 'Combining Stochastic Dynamical StateVector Reduction with Spontaneous Localization', Physical Review A, 39 (1989), 2277-89. Although they're not entirely equivalent, the 'state vector' referred to in the title of this paper can be taken to be similar to the wavefunction.

نظرية جيراردي وريميني وويبر قيمة هذا الثابت عند ١٠-١٦ لكل ثانية. يفرض هذا تمركز الدالة الموجية وتحدد موضعها مرة كل القليل من مئات ملايين السنوات في المتوسط. مع ذلك، فإن هذا المعدل يعتمد بشكلٍ حسَّاس على عدد الجسيمات المتفاعلة المُضَمَّنة، مثله مثل فك الارتباط، وعلى ذلك يتمركز نظام معقد ويتحدد موضعه بمعدل نحصل على متوسطه عن طريق ضرب عدد الجسيمات في ١٠-١٦ لكل ثانية.

يعني هذا أن الدالة الموجية لنظام كمي يتكوَّن من جسيم مفرد أو من عدد صغير من الجسيمات لا يتمركز ويتحدد موضعه أبدًا: يواصل التطور في الزمن وفق معادلة شرودنجر. لا نجد فارقًا عمليًّا بين نظرية جيراردي وريميني وويبر وبين ميكانيكا الكم المعتادة -على الأقل بالنسبة إلى الأنظمة الكمية- عندما نستقر على هذه الاختيارات للثوابت. إلا أنه مع أي نوع من أجهزة القياس التي تتكون من تريليونات وتريليونات الجسيمات، يزداد متوسط معدل التمركز بحيث تتمركز الدالة الموجية (تنهار) في خلال بضعة أجزاء من بليون جزء من الثانية: «لا تظل قطة (شرودنجر) ميتة وحية لأكثر من جزءٍ ضئيلٍ للغاية من الثانية»[١].

ثمة تشابهات واضحة مع ميكانيكا فك الارتباط، إلا أن نظرية جيراردي وريميني وويبر أضافت مزية فرض اختيار نتيجة قياس معينة،

---

(١) J. S. Bell, 'Are There Quantum Jumps?', in C. W. Kilmister (ed.), Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath (Cambridge University Press, Cambridge,UK, 1987), pp. 41–52. This article is reproduced in Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, pp. 201–12. This quote appears on p. 204.

مع أنها لا تزال عملية عشوائية للغاية مرتبطة بالتمركزات التلقائية.

ثمة نسخٌ لآليات الانهيار التلقائي تعتبر تنويعات على موضوع نظرية جيراردي وريميني ووبر، لكنها تنصب على أمور تتعلق بالتطبيق، على سبيل المثال تطبيق النظرية على أنظمة كمية تتكون من فرق من الجسيمات المتماثلة، والتي تجعل آلية الانهيار آلية متصلة. علينا قبول أن مثل هذه الآليات تضاف إلى ميكانيكا الكم المعتادة، لا لشيء إلا لإرضاء تصوراتنا الميتافيزيقية المسبقة بخصوص واقعية الدالة الموجية (فرضية #٣). إلا أنه على الرغم من أننا قد نُعرِض عن الطبيعة الارتجالية لهذه المراوغات الخاصة، فإنه علينا الاعتراف كذلك -مرة أخرى- أن هذه التوجهات الواقعية قد استثارت فضولًا كافيًا لحث البحث عن برهان تجريبي. بمعنى آخر، تعتبر نظرية جيراردي وريميني ووبر تفسيرًا «إيجابيًّا وفعَّالًا» وفق الفرضية #٤ (انظر الملحق). تُعد الكثير من الجهود التجريبية لرصد فك الارتباط بمثابة بوتقة دليل محتمل كذلك بخصوص آليات الانهيار التلقائي. وعلى الرغم من عدم حصولنا حتى الآن على دليل مفصل، فإننا نجد جيراردي متفائلًا: «لا يبدو أن اختبارات التمييز الكامل بعيدة المنال تمامًا»[١].

ثمة المزيد بخصوص ذلك في الجزء المتبقي من هذا الفصل.

إلا أن طرح ثوابت فيزيائية جديدة دائمًا ما كان أقل إقناعًا مقارنة بالحصول على حلولٍ لمعضلة ظهرت طبيعيًّا من النظرية نفسها.

---

(١) Giancarlo Ghirardi, 'Collapse Theories', Stanford Encylopedia of Philosophy, Substantive Revision, February 2016, p. 51.

تَذَكَّر أن أينشتاين في أواخر حياته مال إلى افتراض أن كل هذه المعضلات سوف تُحل بواسطة نظرية مُوَحَّدة كبرى مخاتلة، من الواضح أن ميكانيكا الكم ليست النهاية، لم ينتهِ الأمر بعد. تعتمد ميكانيكا الكم على افتراض خلفية مكانية وزمانية، لا تختلف كثيرًا عن مطلقات نيوتن الميتافيزيقية، وبالمقارنة فإن المكان والزمان في نظرية أينشتاين النسبية العامة «عَرَضِيَّان». يطرح هذا سؤالًا مهمًّا وحيويًّا، هل يمكن لنظرية كمية للجاذبية أن تنقذنا؟

في النسبية العامة، يحل الزمكان المنحني محل التأثير عن بُعد الذي تفرضه قوى جاذبية نيوتن الكلاسيكية. يرتبط مقدار انحناء الزمكان في منطقة معينة بكثافة الكتلة – الطاقة الموجودة. يفسر ويلر الأمر على هذا النحو: «يخبر الزمكان المادة كيف تتحرك، وتخبر المادة الزمكان كيف ينحني»[١].

قاد هذا المنطق عددًا من الفيزيائيين -ابتداء من فينمان- إلى افتراض أن بنية الزمكان نفسها قد تلعب دورًا في ميكانيكا الكم. اقترح لاجوس ديوسي (في عام ١٩٨٧) ومن بعده روجر بنروز (في عام ١٩٩٦) نوعًا آخر من آليات الانهيار التلقائي، يُشار إليها الآن باسم نظرية ديوسي – بنروز[٢]. ذهبا إلى أن التراكب الكمي يبدأ في الانحلال ثم الانهيار في

(١) John Wheeler, with Kenneth Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics (W.W. Norton, New York, 1998), p. 235.

(٢) L. Diósi, 'A Universal Master Equation for the Gravitational Violation of Quantum Mechanics', Physical Letters A, 120 (1987), 377–81; L. Diósi, 'Models for Universal Reduction of Macroscopic Quantum Fluctuations', Physical Review A, 40 (1989), 1165–74; and Roger Penrose, 'On Gravity's Role in Quantum State Reduction', General Relativity and Gravitation, 28 (1996), 581–600.

النهاية إلي حالات كمية محددة عندما يواجه منطقة ذات انحناء مؤثر في الزمكان. على العكس من فك الارتباط أو من نظرية جيراردي وريميني وويبر -حيث عدد الجسيمات هو أساس الانهيار- نجد أن كثافة الكتلة - الطاقة في نظرية ديوسي - بنروز هي ما تهم، إذ إنها تحدد مدى انحناء الزمكان من حولها. كتب بنروز في كتابه الجماهيري «عقل الإمبراطور الجديد»[1]:

«وجهة نظري الخاصة أنه بمجرد إدخال قدرٍ مؤثّر من انحناء الزمكان، يجب أن تفشل قواعد التراكب الكمي الخطي. تحل البدائل الفعلية المحتملة محل تراكبات سعات الحالات المختلفة الممكنة - ويقع أحد البدائل بالفعل حقًّا».

هذا رائع تمامًا. على النطاق الكمي، تكون التأثيرات الجذبوية (انحناء الزمكان) غير مؤثّرة، تترك الدالة الموجية حرة كي تتطور وفق معادلة شرودنجر. إلا أن هذه التأثيرات تصبح ذات أثرٍ أكبر وأكبر عندما تواجه الدالة الموجية جهاز قياس كلاسيكيًّا. يتخلق النظام الكمي في المعمل الذي يقع بالتأكيد في المجال الجذبوي للأرض، لذلك اقترح بنروز أن الفارق في انحناء الزمكان بين الوضعين هو ما يستحث الانهيار.

تفسر نظرية ديوسي - بنروز كيف يحدث فك الارتباط الذي تستحثه الجاذبية أو آليات الانهيار التلقائي للنظريات الشبيهة بنظرية جيراردي وريميني وويبر، إلا أن هذه الحجج لا تشتق من نظرية كمية ناضجة

---

(١) Roger Penrose, The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics (Vintage, London, 1990), p. 475.

للجاذبية. يكمن الإحباط في أن الترشيحات الأساسية الحالية لمثل هذه النظرية (الجاذبية الكمية الحلقية (النظرية المفضلة لي شخصيًّا) ونظرية الأوتار الفائقة) لا يمكنها توضيح الأمور بصورة أكبر. قد تكون هناك بعض التبصرات التي نحصل عليها بالفعل، مثل طرح سمولين أن الاتصال اللا محلي بين كمات المكان الذي تتنبأ به النظرية الكمية الحلقية قد يفسر اللا محلية في ميكانيكا الكم(١). إلا أنه من المبكر أن تكون حاسمة بخصوص أي من هذا. بقدر ما أعرف، لا تزال نظريات الجاذبية الكمية هذه معتمدة بصورة كبيرة على ميكانيكا الكم وتعتبر نظرية الكم نظرية تأسيسية بالنسبة إليها، وهذه النظريات في حد ذاتها لا تحتاج إلى أن يكون هذا الأساس الخاص مختلفًا عمَّا هو عليه(٢).

يبدو أنه من غير المحتمل الحصول على أي إجابات مباشرة من النظرية في وقتٍ قريبٍ. وعلى الرغم من هذا، فإننا نرى مرة أخرى كيف كانت الأطروحات القائمة على تفسيرات واقعية محفزة لمجتمعات التجريبيين. يأتي طرح -ولا يهم مقدار هشاشته أحيانًا- يذهب إلى أن الواقع قد يكون مختلفًا بالفعل عن فهمنا له، وذلك في أمور يمكننا تقصيها من خلال التجريب، يكفي ذلك كي يستثير اهتمام التجريبيين. إنه سببٌ أكثر من كافٍ كي يعودوا إلى تسلُّق متن سفينة العلم والإبحار نحو شواطئ الواقع التجريبي.

---

(١) انظر: Jim Baggott, Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe (Oxford University Press, Oxford, 2018), pp. 259–62

(٢) وهو السبب وراء أن روفيللي وسمولين -اللذين اشتركا لمدة طويلة في نظرية الجاذبية الكمية الحلقية- سعيا بطرقهما الخاصة إلى القبول بتفسير لميكانيكا الكم.

يلخص بنروز في كتابه الأحدث (الموضة والإيمان والخيال) Fashion, Faith, Fantasy أُطروحات متنوعة حديثة فاعلة تسعى إلى اختبار هذه التصورات[١]. تتضمن إحدى هذه الأطروحات رَنَّانًا كميًّا ماكروسكوبيًّا (MAQRO) مثبّتًا في قمر صناعي يدور حول الأرض، يهدف إلى اختبار تنبؤات ميكانيكا الكم بخصوص التراكبات الكمية لأشياء تحتوي على أكثر من مائة مليون ذرة[٢]. من المأمول في هذه الظروف أن تصل التجربة إلى الكشف عن الاختلافات الدقيقة للغاية بين تنبؤات ميكانيكا الكم ونظرية جيراردي وريميني وويبر ونظرية ديوسي - بنروز.

تعتبر مهمة MAQRO الفضائية مهمة «متوسطة الحجم». طُرِحت لأول مرة على وكالة الفضاء الأوروبي ESA في عام ٢٠١٠ وقد حُدِّث هذا الطرح بصورة جوهرية وأُعيد تقديمه للوكالة في عام ٢٠١٥ [٣]. ثم أُعيد تقديمه في سبتمبر ٢٠١٦ في استجابة إلى نداء أطلقته وكالة الفضاء الأوروبي من أجل «أفكار علمية جديدة»، وقد أُختير في عام ٢٠١٨ من أجل تحرٍّ أكثر تفصيلًا وعمقًا بجريه (مرفق التصميم المتزامن)[٤].

---

(١) Roger Penrose, Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2016), p. 215.

(٢) Rainer Kaltenbaek, Gerald Hechenblaikner, Nikolai Kiesel, Oriol Romero-Isart, Keith C. Schwab, Ulrich Johann, and Markus Aspelmeyer, 'Macroscopic Quantum Resonators (MAQRO)', Experimental Astronomy, 34 (2012), 123–64, see also arXiv:quantph/1201.4756v2, 19 March 2012.

(٣) Rainer Kaltenbaek, et al., 'Macroscopic Quantum Resonators (MAQRO): 2015 Update', EPJ Quantum Technology, 3 (2016), 5

(٤) من أجل المزيد من التفاصيل وتتبُّع تقدُّم المشروع، انظر: http://maqromission.org

إذا حصلت المهمة على شرارة البدء، فسوف تبني على كل المعارف التي جاءت من المهمة الحديثة الناجحة للغاية (مستكشِف LISA) التي أُطلِقت في ديسمبر ٢٠١٥، وصُمِّمت لاختبار تكنولوجيا قادرة على رصد موجات الجاذبية في الفضاء[١].

قُدِّرت تكلفة مهمة مستكشِف LISA في عام ٢٠١١ ب ٤٠٠ مليون يورو[٢]. لو وضعنا هذا في الاعتبار، فإنه إذا أقرت مهمة MAQRO فمن غير المحتمل أن تنطلق قبل عشرة سنوات أخرى أو أكثر، إذ إن مخصصاتها المالية سوف تكون أكبر بكثيرٍ من هذا، لا محالة. لقد قلتُ من قبل إن التصورات الميتافيزيقية المسبقة التي تؤدي إلى قناعات واقعية بين فيزيائيي الكم، تأتي بثمنٍ فادحٍ.

من المؤكد أن مهمة MAQRO سوف تقوم بما هو أكثر من اختبار تمثل الواقع الكمي في التراكبات الكمية الماكروسكوبية، إلا أن للثمن المدفوع دلالة أكبر من مجرد بعض الألغاز الفلسفية (والصداع العَرَضي).

* * *

---

(١) LISA اختصار ل Laser Interferometer Space Antenna (الهوائي الفضائي لتداخل الليزر).

(٢) https://spacenews.com/lisapathfinderproceeddespite100costgrowth/

الفصل التاسع

ميكانيكا الكم غير مكتملة

لأننا نحتاج إلى تضمين عقلي (أم يجب أن يكون عقلك؟)

«الأنا» الخاصة بفون نيومان وصديق ويجنر والكون التشاركي وشبح الكم في الآلة

بالتأكيد، لا يعود أصل معضلة انهيار الدالة الموجية إلى عام ١٩٣٢ ونشر فون نيومان لكتابه الأسس الرياضية لميكانيكا الكم، إلا أنه من العدل أن نقول إن مقاربته للقياس الكمي جلبت المعضلة إلى العلن، ومنذ تلك اللحظة بدأت في قضِّ مضاجع فيزيائيي الكم والفلاسفة طوال تسعين عامًا الماضية أو ما يقرب من ذلك.

وكما رأينا، يصرف اللا واقعيون النظر عن الانهيار، ويعتبرون أنه لا يمثِّل معضلة، وأن فهمه ليس أصعب من فهم التغيُّر المفاجئ في معرفتنا عندما نحصل على بعض المعلومات الجديدة. سعى قليلٌ من المُنَظِّرين الذين يميلون إلى التصورات الواقعية إلى تعيين آليات فيزيائية، تعمل على دوال موجية واقعية فيزيائيًّا، صُمِّمت تلك الآليات في محاولة لتفسير كيف تتحوَّل «و» إلى «أو».

لكن ما الذي كان يعتقده فون نيومان نفسه بخصوص ما يجري؟

مَيَّز فون نيومان بوضوحٍ في نصِّه الكلاسيكي بين نمطيْ عمليات كمية بينهما اختلافٌ جوهري. النمط الأول، الذي أشار إليه باعتباره العملية ١، وهي التحوُّل غير المتصل وغير الانعكاسي للحالة الكمية النقية إلى خليط، متضمنة «إسقاط» دالة موجية ابتدائية ما على نتيجة واحدة من مجموعة نتائج قياس محتملة، ويصاحب ذلك زيادة في الإنتروبيا. نطلق على هذا الآن انهيار الدالة الموجية، إلا أن فون نيومان نفسه لم يستخدم الاصطلاح[1]. العملية ٢ هي تطور الدالة الموجية المتصل والحتمي والقابل للانعكاس بالكامل، محكومًا بمعادلة شرودنجر وفق المسلمة #٥ (انظر الملحق). إن هاتين العمليتين متمايزتان: لا يمكن للعملية ١ أن تحدث في العملية ٢، والعكس بالعكس.

عقب ذلك نظر في القياس الكمي من منظور ثلاثة مكونات أساسية، صنَّفها I وII وIII:

I النظام الكمي تحت الفحص.

II القياس الكمي.

III الراصد.

ثم واصل نحو توضيح أنه إذا كان النظام الكمي I موجود في حالة تراكب لنتائج القياس (على سبيل المثال، جسيم A في تراكب كمي

(١) مال إلى اجتناب كلمة «دالة موجية»، ربما لأنها وثيقة الصلة بميكانيكا شرودنجر الموجية. فَضَّل التفكير في صياغة النُظُم الكمية على نحوٍ أكثر تجريدًا إلى حدٍّ ما، من خلال «دوال حالة» في «فضاء هيلبرت» الرياضي، وهذه هي الصياغة التي تُدَرَّس إلى الطلاب اليوم، مع بعض التعديلات.

لحالتي ↑ و↓)، إذن سوف يتطور في سلاسة واتصال وفق العملية ٢. عندما تصادف الدالة الموجية جهاز القياس، تصبح متشابكة، إلا أن فون نيومان لم يجد سببًا لافتراض أن ميكانيكا الكم تتوقف عن العمل على هذه المقاييس الكلاسيكية. على ذلك يجب أن تستمر الدالة الموجية المتشابكة في التطور بسلاسة وفق معادلة شرودنجر. لا تزال العملية ٢ هي التي توجِّه الأمور.

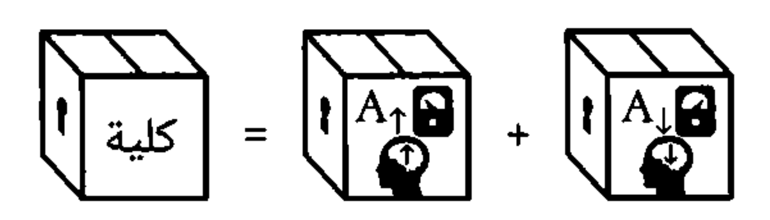
بعد ذلك إذا شبكنا الجهاز بعدَّاد، نعرف جيدًا الآن أن هذا يؤدي إلى تراكبٍ آخر يتكوَّن من المكونين A↑، مؤشر إلى اليسار وB↓، مؤشر إلى اليمين.

لم يجد فون نيومان سببًا يتأسَّس خصوصًا على الرياضيات، يجعله يفترض أن للعملية ١ أي دور تلعبه في النظام المركب I زائد II. تنطبق العملية ٢ على أجهزة القياس الكلاسيكية والعدادات كما تنطبق على الأنظمة الكمية بالدرجة نفسها تمامًا.

لن ينشر شرودنجر ورقته البحثية التي تحتوي على إشارة إلى قطته الشهيرة إلا بعد ثلاثة أعوامٍ أخرى، وكان فون نيومان على وعي بتداعيات الارتداد اللا نهائي بالفعل. إلا أن حلَّه للمعضلة كان مباشرًا تمامًا. إذا كانت ميكانيكا الكم المصاغة عن طريق العملية ٢ تنطبق بالدرجة نفسها تمامًا على أجهزة القياس الكلاسيكية، إذن ومرة أخرى لا وجود لسببٍ جيدٍ لافتراض أنها تتوقف عن العمل عندما ننظر في أمر وظائف أعضاء الحس البشرية، وصلاتها بالمخ والمخ نفسه. افرض أن للمعمل ضوءًا يصدر من سقفه، ويضيء شاشة العداد، يتجمع بعض الضوء المنعكس

ويتركز على شبكيتيْ الراصد. يستثير هذا إشارات كهربية في العصبين البصريين، تسافر إلى القشرة البصرية الموجودة في مؤخرة مخ الراصد.

يمكننا أن نختار ببساطة مد تعريف «النظام الكمي» في I ليتضمن الجسيم A وجهاز القياس الكلاسيكي والعداد والضوء المنعكس. يتضمن المُكَوِّن II -«القياس الفيزيائي»- الجهاز الحسي للراصد والمخ. ولا تزال النتيجة تراكبًا آخر:



يستلزم هذا دخول الراصد في تراكب «لحالتيْ مخ «مخ فيه ↑ ومخ فيه ↓».

كتب فون نيومان(١):

«تصف ميكانيكا الكم الأحداث التي تحدث في الجوانب المرصودة من العالَم عن طريق العملية ٢، ما لم تتفاعل مع الجانب الراصد... إلا أنه بمجرد حدوث هذا التفاعل، أي القياس، تتطلب تطبيق العملية ١».

إذن ما الذي كان يدور في عقله بخصوص «الجانب الراصد» من العالَم؟ يطرح فون نيومان أن المُكَوِّن III يتركب من «الأنا المجردة»

(١) John von Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1955), p. 420.

للراصد، ودليلنا على هذا الطرح حوارات أجراها مع مواطنه المجري ليو زيلارد، وهو ما يعني أن العملية ١ -انهيار الدالة الموجية- لا تحدث إلا عند تسجيل نتيجة القياس في عقل الراصد الواعي.

يبدو المنطق عصيًا على الفهم إلى حدٍّ كبيرٍ. لم يعلن أي راصد أبدًا عن خبرة بتراكب لحالتي مخ (أو على الأقل من يعلن عن خبرة مباشرة بمثل هذا التراكب لا يُعامل بجدية أبدًا). إن للمكونين I وII طبيعة ميكانيكية بالكامل - يتضمنان فيزياء وكيمياء حيوية. أما المُكوِّن III فليس ميكانيكيًا، لذا لم يبقَ أمامنا سوى استنتاج أن المكون III هو موضع انحلال التطور المتصل للدالة الموجية - موضع انحلال عملية ٢، حيث تحل العملية ١ محلها.

إلا أن هذا الاستنتاج ليس غريبًا أبدًا لو أخذنا في الاعتبار ما اضطلع به فون نيومان في كتابه (الأسس الرياضية)، إذ قصد إلى توفير قواعد رياضية أكثر تماسكًا لميكانيكا الكم، باستخدام مقاربة هيلبرت المُسَلَّماتية. وكما ذكرتُ في السابق، فإن هذه المسلمات (خاصة المسلمة #١) عملت على تحصين تفسير كوبنهاجن السائد في الصياغة نفسها بشكلٍ مباشرٍ. وعلى الرغم من أن بور كان أكثر حيرة بخصوص ما الذي يعنيه هذا حقًّا، فإن منظور هايزنبرج كان لا واقعيًّا في صرامة. مع ذلك مضى فون نيومان في نظريته عن القياس الكمي أبعد من تفسير كوبنهاجن، إذ تجاهل إصرار بور على الحد المستبد بين العالمين الكمي والكلاسيكي.

أعتقد أن طرح دورٍ للوعي في عملية القياس، يمثِّل إضافة إلى الصيغة المعتادة لميكانيكا الكم، يبدو متعارضًا مع مسلَّمة «لا شيء هنا

كي نراه». أظن أن فون نيومان كان يعتبر أن المسلمة #١ تدل على البنية الرياضية فقط، وأن المُكوِّن III المزمع إضافته غير رياضي قطعًا. كتب: «تبقى III خارج الحسابات»[١].

لا يزال في الإمكان تفسير نظرية فون نيومان -كما هي- بطريقتين مختلفتين تمامًا. يوافق اللا واقعي على صياغة المكونين I وII ولا يفسر III على أنه انهيارٌ فيزيائي، بل تسجيل لنتيجة القياس، وتحديث لحالة معرفة الراصد به. يتضمن هذا بالتأكيد عقلَ الراصد الواعي، إلا أنه يتضمنه من منظورٍ سلبي فقط، وهو ما يعود بنا إلى تفسيرات ميكانيكا الكم العلائقية، أو نظرية المعلومات أو الكيوبيزمية (اختر ما شئت).

إلا أنه يبدو أن فون نيومان اعتنق منظورًا مختلفًا. إذ قصد أن يصبح المُكَوِّن III الموضع الذي تحدث فيه العملية ١، والتي اعتبرها انهيارًا فيزيائيًا واقعيًا. اهتمَّت محاوراته الطويلة مع زيلارد بعمل الأخير المتعلق بتقليل الإنتروبيا في أنظمة ديناميكا حرارية من خلال تدخل كائنات ذكية، تنويعًا على شيطان ماكسويل[٢]. لاحظ الفيلسوف ماكس يامر أن هذا

---

(١) Ibid., p. 421.

(٢) L. Szilard, 'On Entropy Reduction in a Thermodynamic System by Interference by Intelligent Beings', Zeitschrift fur Physik, 53 (1929), 840–56. NASA Technical Translation F-16723.

شيطان ماكسويل، هي تجربة ذهنية ابتدعها ماكسويل لإثبات أن الإنتروبيا هي خاصية إحصائية فقط، إذ ذهب إلى أنه لو افترضنا وجود غرفتين بينهما بابٌ، يقف عليه شيطانٌ، يستطيع بشكلٍ واعٍ تمرير جزيئات الغاز الساخنة كما يريد، فعندها يستطيع أن يقلِّل الإنتروبيا ويرفع من حالة الانتظام إذا تعمَّد تمرير الجزيئات الساخنة نحو غرفة واحدة والباردة نحو الغرفة الأخرى. (المترجم).

النوع من الأوراق البحثية «توضح بداية افتراضات عصف ذهني معينة حول تأثير التدخل الفيزيائي للعقل وعمله على المادة»[1].

يستلزم انهيارٌ فيزيائي واقعي دالة موجية واقعية، وبالتالي دورًا أكثر فعالية بكثيرٍ لعقل الراصد الواعي. لهذا السبب ضمَّنت نظريات (الوعي يسبِّب الانهيار) في مجموعة التفسيرات الواقعية لنظرية الكم الخاصة بي. لم يكن فون نيومان واضحًا بخصوص ما يعتقده حيال تفسير الدالة الموجية، وهو ما يضيف للتشوش بالتأكيد (إلا أن ما يعتقده يصبُّ في هذا الاتجاه على الأرجح).

إلا أننا نحتاج إلى أن نسأل أنفسنا الآن: من هو الراصد؟ دعنا نعود إلى السيناريو الذي أوليناه اهتمامنا عدة مرات في السابق، تقوم أليس فيه بقياسٍ في المعمل بينما تأخر بوب في الممرِّ. سوف أقوم بتعديلٍ واحدٍ صغيرٍ. سوف أستبدل ببوب مُنَظِّرًا معروفًا، هو يوجين ويجنر، أليس وويجنر صديقان مقربان[2].

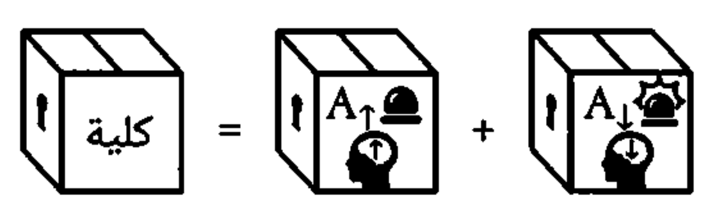
نتذكر أن أليس تجري قياسًا على نظام كمي، يتكون من فرقة من جسيمات A مُعدَّة في تراكب كمي لحالتي ↑ و↓. لا يتصل جهاز القياس بعدَّاد، بل يتصل حاليًّا بزر إنارة بسيط بدلًا من ذلك. إذا سجل الجهاز

---

(1) Max Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics (Wiley, New York, 1974), p. 480.

(2) كان يوجين ويجنر مواطنًا مجريًّا آخر. كان ويجنر مع زيلارد وإدوارد تيلر، جزءًا من «المؤامرة المجرية» التي دفعت أينشتاين إلى كتابة رسالة إلى رئيس الولايات المتحدة فرانكلين ديلانو روزفلت في ٢ أغسطس ١٩٣٩ محذِّرًا إياه من «قنابل قوية للغاية من نوعٍ جديدٍ» انظر: Jim Baggott, Atomic: The First War of Physics and the Secret History of the Atom Bomb 1939–49 (Icon Books, London, 2009), pp. 18–19.

نتيجة ↑، لا يتحرك الزر ولا يومض الضوء، وإذا سجل الجهاز نتيجة ↓، يتحرك الزر ويومض الضوء. أجرت التجربة مرة، ورصدت ومضة الضوء، لا يزال ويجنر في الممرِّ. بالنسبة إلى ويجنر، للدالة الموجية الكلية التي أجرت عليها أليس للتوِّ تجربة صورة تراكب كمي آخر يتضمن نتيجتي القياس A↑ وA↓، وحالتي الضوء الممكنتين «مضاء» و«مطفأ» وحالتي مخ أليس المحتملتين «مخ فيه ↑» و«مخ فيه ↓».



يدخل ويجنر إلى المعمل الآن. تدور المحادثة التالية:

يسأل ويجنر: «هل رأيتِ ومضة الضوء؟».

ترد أليس: «نعم».

بالنسبة إلى ويجنر، سُجِّلت نتيجة القياس للتوِّ في عقله الواعي، وتنهار الدالة الموجية في حالة A↓ وومضة ضوء ومخ فيه ↓.

إلا أنه بعد بعض التدبر، يقرر أن يتحقَّق من صديقته أكثر.

«ماذا كان إحساسك بخصوص ومضة الضوء قبل أن أسألك؟».

بدأت أليس تشعر ببعض الضيق وهو أمر مفهوم، ردَّت في حدة: «أخبرتكَ للتوِّ، رأيتُ ومضة ضوءٍ».

لم يرد ويجنر أن يضع أي ضغوط أخرى على علاقته بأليس، لذا يقرر قبول ما تخبره به. يستنتج أن الدالة الموجية يجب أن تكون قد انهارت

بالفعل إلى حالة A↓ وومضة ضوء ومخ فيه ↓، قبل أن يدخل المعمل ويطرح السؤال، كما أن التراكب السابق الذي ظن أنه الوصف الصحيح هو في الحقيقة خاطئ. يبدو هذا التراكب «عبثيًا لأنه يستلزم أن تكون صديقتي في حالة حركة معلقة، قبل أن تجيب عن سؤالي»(١). كتب:

«يستتبع هذا أن الكائن ذا الوعي يجب أن يحظى بدورٍ مختلفٍ في ميكانيكا الكم عن جهاز القياس غير الحي... من غير اللازم أن نرى تضاربًا هنا من منظور ميكانيكا الكم التقليدية، ولا يوجد تضارب لو اعتقدنا أن البديل لا مغزى له، سواء احتوى وعي صديقي على انطباع رؤيته للومضة أو عدم رؤيته للومضة. إلا أن إنكار وجود وعي صديقي لهذه الدرجة هو موقف غير طبيعي بالتأكيد، يقترب من وحدة الأنا(٢)، وسوف يتقبَّل عددٌ قليل من الناس صدق مثل هذا الاعتقاد».

هذه هي مفارقة صديق ويجنر، ومن أجل أن نحلها علينا افتراض أن انهيار الدالة الموجية غير القابل للانعكاس استحثَّه أول عقل واعٍ قابله.

ثمة المزيد، لا يوجد في العالم الفيزيائي موضعٌ من الممكن فيزيائيًّا فيه أن تبذل فعلًا على جسم من دون رد فعل، إنه قانون نيوتن الثالث للحركة. هل يجب أن يكون الوعي مختلفًا؟ يُوَلِّد فعل العقل الواعي

---

(١) Eugene Wigner, 'Remarks on the Mind-Body Question', in I. J. Good (ed.), The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-Baked Ideas (Heinemann, London, 1961), pp. 284–302. This is reproduced in John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983), pp. 168–81. These quotes appear on pp. 176–8.

(٢) وحدة الأنا، مذهبٌ فلسفي يرى أنه لا وجود لشيء إلا الذات أو الأنا أو عقل الفرد. (المترجم).

الذي يتسبَّب في انهيار الدالة الموجية ردًّا للفعل في التوِّ، على الرغم من صغره - تتخلَّق معرفة بحالة النظام بشكلٍ غير قابل للانعكاس في عقل الراصد (إنها معرفة لا تُمحى). قد يقود رد الفعل هذا إلى تأثيراتٍ فيزيائية أخرى، مثل كتابة نتيجة في دفتر المعمل، أو نشر ورقة بحثية، أو الفوز بجائزة نوبل. في هذه الفرضية، يوازن تأثير العقل في المادة تأثير المادة في العقل.

إذا أدخلنا دورًا للوعي في تمثلنا لميكانيكا الكم، إذن علينا الاعتراف بصحة واحدة من عبارات ويلر المفضلة، قال في إعادة صياغة لبور: «لا تكون ظاهرة أولية ظاهرة حتى تصبح ظاهرة مُسَجَّلة (مرصودة)»[١]. بدلًا من أن يفسر عملية التسجيل هذه ببساطة على أنها تغير لا انعكاسي في معرفتنا بالنظام. استكشف ويلر تفسيرًا أكثر واقعية، العملية فيه هي فعل خلق لا انعكاسي بالفعل. «إننا متورطون -لا مفر- في استحضار ما يبدو أنه يحدث»[٢].

بذل ويلر جهدًا كبيرًا لفصل مفهوم «الظاهرة الكمية» عن الوعي، وذهب إلى أن فعل التضخيم الفيزيائي غير الانعكاسي هو ما يستحضر الظاهرة، إلا أن عبارته تتضمن كلمة «مرصودة»، وإذا قبلنا بدورٍ للرصد الواعي في فيزياء الكم، نصل إلى الاستنتاجات نفسها تقريبًا. إذا كان الوعي لازمًا من أجل انهيار الدالة الموجية و«جعلها واقعية»، إذن يمكننا

(١) John Archibald Wheeler, 'Law without Law', in Wheeler and Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement, pp. 182–213. This quote appears on p. 184.

(٢) Ibid., p. 185.

القول إن الحالة الكمية التي تمثِّلها لا توجد حتى تصبح جزءًا من خبرة الراصد الواعية. يفصل هذا عن رفض الفرضية #١ خطوة صغيرة نسبيًا، لا وجود لشيء ما لم يختبره الوعي ولا وجود لشيء حتى يختبره الوعي.

وبالفعل أسهب ويلر نفسه في عام ١٩٧٧ في شرح ما سوف يصبح معروفًا باسم «المبدأ الإنساني التشاركي»[١]:

«إن أكبر داعمٍ لهذه الأطروحة... هو المبدأ الإنساني (لبراندون كارتر و(روبرت) ديكي و... إذ ينصُّ على دورٍ جوهري للراصد المشارِك - كما تبرهن عليه ميكانيكا الكم - عند تعيين أي مفهوم مفيدٍ عن الواقع. لا يوجد سبيل واضح لجمع هذه التبصرات معًا في وحدة واحدة كبيرة إلا عبر نظرية (التكوين من خلال الرصد)».

تعني كلمة «الإنساني» هنا أنه متعلقٌ بالجنس البشري أو بالبشرية». على الرغم من أن ويلر سوف يعلن لاحقًا أن «عين» الراصد «قد تكون أيضًا قطعة من حجر الميكا»[٢]، فإنه من المستحيل بالفعل قراءة هذا المقال المنشور في عام ١٩٧٧ من دون استنتاج أن هذا «عنَّا»، نحن المشاركون في كون، نخلقه عن طريق رصده. قَبِل جون بارو وفرانك

---

(١) John Archibald Wheeler, 'Genesis and Observership', in Robert E. Butts and Jaakko Hintikka (eds), Foundational Problems in the Special Sciences (D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1977), p. 28. كان ويلر يشير إلى روبرت ديكي الذي أبرز مسألة «الضبط الدقيق» في القوانين الفيزيائية والثوابت التي تبدو ضرورية من أجل أن تصبح الحياة ممكنة في الكون، كما كان يشير إلى براندون كارتر الذي طَوَّر المبدأ الإنساني في عام ١٩٧٤ باعتباره تحديًا مباشرًا للمبدأ الكوبرنيكي.

(٢) John Wheeler, with Kenneth Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics (W.W. Norton, New York, 1998), p. 338.

تيبلر بميول ويلر في مراجعتهما الشاملة للمنطق الإنساني، تحت عنوان «المبدأ الكوني الإنساني»، واعتبراها متسقة مع نسخة مما أطلقا عليه المبدأ الإنساني القوي: «إن الراصدين لازمون من أجل جلب الكون للوجود»[1].

حسنًا، هكذا جلسنا في استرخاء في هذه الزيارة الخاصة لشواطئ الواقع الميتافيزيقي على كرسي من كراسي الشاطئ ، الشمس مشرقة، نستمتع بالظل، ونرشف المارجريتا، جئنا هنا كي نمكث فترة. إن المنطق واضحٌ، نحاول هنا حل أحجيتين فلسفيتين راسختين بعمقٍ، انهيار الدالة الموجية وطبيعة الوعي، نفعل ذلك عن طريق جمعهما معًا ببساطة. يتوجب عليَّ أن أقول إن هذا لم يستثرني أبدًا، كي أعتبره سبيلًا مثمرًا يمكننا المضي فيه.

عندما نُدخِل الوعي في الخليط، نستدعي كمية مُرَوِّعة من الأسئلة الصعبة، ما الوعي؟ وكيف يعمل؟ ما المقصود عندما نقول إن الوعي شيء غير «ميكانيكي»؟ وما الدليل الذي بحوزتنا على هذا؟ كيف يُفتَرَض أن الوعي يستحث انهيار الدالة الموجية؟ هل انهيار الدالة الموجية مسؤولٌ عن الوعي بالفعل؟ هل العقل حاسوب كمومي؟

لا شكَّ أن هذه الأسئلة مثيرة للتفكير، إلا أن عليك ألا تتوقع العثور على الكثير للغاية من الإجابات الجاهزة. إن دراسة الوعي هي الحقل الفكري الوحيد الذي مررتُ به وكانت بنيته الأساسية تقوم على

---

(١) John D. Barrow and Frank Tipler, The Anthropic Cosmological Principle (Oxford University Press, Oxford, 1986), p. 22.

معضلاته. لدينا «المعضلة الصعبة» للوعي، ومعضلة «العقل - الجسد» ومعضلة «العقول الأخرى» والكثير من المعضلات الأخرى. غَذَّت هذه المعضلات الكثير من التدبُّر الفلسفي والعديد من المقالات، مع ذلك فمن الواضح عدم وجود اتفاق عام على الحلول.

نجد أنفسنا في موقفٍ عجيبٍ تمامًا، إن الوعي شخصيٌّ جدًّا. تعرف شعور الحصول على خبرات واعية بالعالم الخارجي ولديك ما قد أُطلِق عليه حياة ذهنية داخلية، لديك هواجس وتفكر في هذه الهواجس، تعرف ماهية وعيك أو على الأقل تعرف شعورك به، إذن ما المشكلة؟

كي نجيب عن هذا السؤال، من المفيد تتبُّع العمليات الفيزيائية في الإدراك الواعي لزهرة حمراء. إن الزهور حمراء لأن بتلاتها تحتوي على خليطٍ دقيقٍ لكيماويات الأنثوسيانين، يزداد احمرارها لو نمت في تربة ذات حموضة طفيفة. يتفاعل الأنثوسيانين في بتلات الزهرة مع ضوء الشمس، يمتص أطوالًا موجية معينة، ويعكس الضوء الأحمر بالدرجة الأولى، وهو إشعاع كهرومغناطيسي له أطوال موجية تتراوح بين ٦٢٠ و٧٥٠ جزءًا من بليون جزءٍ من المتر، تقع في نهاية الأطوال الموجية الطويلة للطيف المرئي، إذ تنحصر بين الأشعة تحت الحمراء غير المرئية وبين الأشعة البرتقالية. يتكون الضوء بالتأكيد من فوتونات، إلا أننا لن نجد خاصية «احمرار» أصيلة في الفوتونات التي لها طول موجي ضمن هذا النطاق، وذلك مهما بحثنا في مثابرة. وبعيدًا عن الاختلافات في الأطوال الموجية (وبالتالي في الطاقة بحسب علاقة بلانك - أينشتاين)، لا شيء في الخواص الفيزيائية للفوتونات يمكن استخدامه لتمييز الأحمر من الأخضر من أي لون آخر.

نمضي قدمًا. يمكننا تتبُّع التغيرات الكيميائية والفيزيائية التي تنتج من تفاعل الفوتونات مع الخلايا المخروطية في شبكيتك وعلى طول الطريق حتى تحفيز قشرتك البصرية في مؤخرة مخك، انظر كما تشاء، إلا أنكَ لن تعثر على الخبرة باللون الأحمر في كل هذه الكيمياء والفيزياء. من الواضح أنك لا تحصل على خبرة واعية بوردة حمراء جميلة إلا عند تركيب هذه المعلومات بطريقة ما بواسطة قشرتك البصرية.

كيف من المفترض أن يحدث هذا؟ هذه هي المعضلة الصعبة، كما أوضح الفيلسوف وعالِم الإدراك ديفيد تشالمرز[1]:

«إن معضلة الوعي الصعبة فعليًّا هي معضلة الخبرة... عندما نرى -على سبيل المثال- نختبر أحاسيس بصرية: الشعور بصفة الاحمرار، اختبار الظلام والنور، خاصية العمق في المجال البصري. تأتي خبراتٌ أخرى من مدركات حواس مختلفة: صوت المزمار، رائحة النفتالين. توجد كذلك الأحاسيس الجسدية، ابتداء من الألم حتى الشبق، وتوجد الصور الذهنية التي نتخيلها في دخائلنا، كما يوجد الإحساس بالمشاعر واختبار تدفق الأفكار الواعية. يوجد شيء متشابه فيما بين هذه الحالات كلها، يربط بينها؛ إذ إن جميعها حالات خبرة».

إن المعضلة صعبة، لأننا لا نفتقد فقط التفسير الفيزيائي لكيفية حدوث هذا، لكننا لا نعرف حتى كيف ننصُّ على المعضلة بشكلٍ سليمٍ.

حسنًا، إذا كانت معضلة «الكيفية» صعبة للغاية، هل يمكننا على

---

(١) David J. Chalmers, 'Facing up to the problem of consciousness', Journal of Consciousness Studies, 2 (1995), 200–19.

الأقل الحصول على بعض المفاتيح عن طريق تأمُّل مكان حدوث هذه الخبرات؟

من الصحيح اعتبار الفيلسوف الفرنسي رينيه ديكارت أبا الفلسفة الحديثة. في كتابه «مقال عن المنهج» الذي نُشِر أول مرة في عام ١٦٣٧، انطلق إلى بناء تقليدٍ فلسفيٍّ جديد بالكامل، يستحيل أن يتسرب فيه أي شك لليقين المطلق لاستنتاجاته. ذهب إلى أنه من اليقين المطلق نحصل على معرفة محددة. إلا أنه كي يصل إلى اليقين المطلق، شعر أنه ما من خيار أمامه سوى رفض كل شيء يحتمل أن يكون لديه تجاهه أبسط أسباب الشك واعتبره زيفًا مطلقًا، عنى هذا رفض كل المعلومات عن العالم، التي استقبلها من خلال حواسه.

لماذا؟ أولًا: لأنه لا يستطيع أن يستبعد تمامًا احتمالية خداع حواسه له من وقتٍ للآخر، عن طريق الخداع البصري - على سبيل المثال، أو عن طريق خفة اليد والتلاعبات الذهنية المُضَمَّنة في الحيل السحرية[١]. ثانيًا: لأنه لا يستطيع التأكد من أن مدركاته وخبراته ليست جزءًا من حلم طويل. أخيرًا: لا يمكنه التأكد من أنه ليس ضحية شيطان ملعون أو عبقري شرير، يمتلك القدرة على التلاعب بأحاسيسه من أجل خلق انطباع زائفٍ تمامًا عن العالم من حوله (مثل الآلات في فيلم «المصفوفة The Matrix).

---

(١) يستكشف عالِما الأعصاب ستيفين ماكنيك وسوزانا مارتينيز كوندي علم أعصاب السحر في كتابهما الممتع «حيل العقل» **Sleights of Mind, published by Profile Books, London, 2011.**

إلا أنه شعر أن ثمة شيئًا واحدًا على الأقل يستطيع أن يوقن به. يستطيع أن يوقن بأنه مخلوقٌ، له عقلٌ واعٍ، لديه أفكار. ولأنه مخلوقٌ مفكرٌ فمن الصعب أن يظن أنه غير موجود، سوف يبدو ذلك متناقضًا، لذلك اعتبر وجوده كذلك شيئًا يستطيع أن يكون موقنًا به. استنتج عبارته الشهيرة Cogito ergo sum، أنا أفكر، إذن أنا موجود.

إن العالم الخارجي مبهمٌ وغير يقيني، وقد لا يظهر على الصورة التي هو عليها بالفعل. إلا أن العقل الواعي يبدو مختلفًا للغاية. مضى ديكارت نحو استنتاج أن هذا يعني بالتأكيد أن العقل الواعي منفصلٌ ومتمايزٌ عن العالم الفيزيائي وكل شيء فيه، بما في ذلك آلية جسده غير المفكرة ومخه. إن الوعي بالتأكيد شيء «آخر»، شيء غير مادي.

تتسق ثنائية العقل – الجسد (تُدعى أحيانًا الثنائية الديكارتية) تمامًا مع الاعتقاد في النفس والروح. ليس الجسد إلا هيكل أو مضيف أو أداة ميكانيكية فقط، تستخدم من أجل منح الجوهر المفكر غير المادي امتدادًا وتعبيرًا خارجيًا. يبدو من الواضح منطقيًا أن هذا النوع من الثنائية، هو ما كان في عقليْ كل من فون نيومان وويجنر عندما عرَّفا الوعي باعتباره (المكون III) الموضع الذي لا تعود الآلية الفيزيائية عاملة فيه، إنه شيءٌ خارج الحسابات ولذلك فهو المكان المثالي لانهيار الدالة الموجية.

إلا أن استنتاج لا مادية الوعي من هذا يتضمن قفزة منطقية جريئة، وهي قفزة يظن الكثير من الفلاسفة وعلماء الأعصاب المعاصرين أنها غير مبررة. تكمن الأزمة في أنه عندما نفصل العقل عن المخ ونجعله غير مادي، ندفعه بعيدًا عن متناول العلم، ونجعل الوصول إليه متعذرًا

تمامًا، يستحيل أن يتعامل معه العلم ببساطة. كتب الفيلسوف جلبرت رايل في كتابه «مفهوم العقل» The Concept of Mind المنشور في عام ١٩٤٩ مستخفًّا من ثنائية العقل – الجسد الكانطية، واصفًا إياها «بالشبح في الآلة»[1]. ذهب الفيلسوف دانيال دينيت في كتابه الصادر عام ١٩٩١ «الوعي مُفَسَّرٌ» Consciousness Explained إلى أن «القبول بالثنائية استسلام»[2].

يكمن السبيل الوحيد للتقدُّم في مواجهة هذا العائق في القيام ببعض الافتراضات. نفترض أن الوعي ينشأ كنتيجة مباشرة للعمليات الكيميائية والفيزيائية التي تحدث في المخ، بغض النظر عن الطريقة التي يعمل بها. لخبرتنا بلون الزهرة الحمراء مقابل عصبي – تتوافق هذه الخبرة مع نشأة مجموعة محددة من الحالات الكيميائية والفيزيائية في مجموعة متمايزة من الأعصاب الموجودة في أجزاء مختلفة من المخ، يُعرف هذا فلسفيًّا باسم «المادية».

يحظى علماء الأعصاب بمجموعة من التقنيات التي تُمَكِّنهم من سبر أغوار ما يجري في المخ بتفصيلٍ دقيقٍ وبطرقٍ لا تتضمن جروحًا أو جراحات، على سبيل المثال التصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي fMRI والتصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني PET. يحفز اختبار شيء ما أو التفكير في شيء ما جزءًا أو أكثر من أجزاء المخ، وعندما تشرع هذه الأجزاء في العمل تسحب جلوكوز وأكسجين من تيار الدم.

---

(١) Gilbert Ryle, The Concept of Mind (Hutchinson, London, 1949).

(٢) Daniel Dennett, Consciousness Explained (Penguin, London, 1991).

ويوضح التصوير باستخدام الرنين المغناطيسي الوظيفي fMRI الأماكن التي يتركز فيها الأكسجين، وبالتالي يوضح أماكن الدماغ البراقة نتيجة لمحفزٍ حسيٍّ ما أو عملية تفكير أو استجابة عاطفية أو ذكرى. يستغل التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني PET دلالة مادة نشطة إشعاعيًّا في تيار الدم، إلا أنه بخلاف ذلك يفعل الشيء نفسه تقريبًا ولكن بوضوحٍ أقل.

ترسَّخت العلوم العصبية في شكلها الحديث في النصف الثاني من القرن الماضي فقط، وتقدَّم فهمنا بدرجة مهولة خلال تلك الفترة القصيرة نسبيًّا. مع ذلك علينا مرة أخرى الاعتراف بأنه في الوقت الذي تكشف فيه دراسة المخ عن المزيد والمزيد من الآليات المادية، لم تحل «المعضلة الصعبة» بعد.

مع ذلك نجد بعض علماء الأعصاب على قناعة بأننا سوف نعثر على الوعي في الحوادث الكيميائية والفسيولوجية العصبية، وبأن الوعي ليس «شيئًا» بل نتيجة منبثقة عن مجموعة معقَّدة من العمليات التي تحدث في مخٍّ متطور[1].

يستلزم التأسيس للوعي في النشاط العصبي أنه ليس مدخرًا حصريًّا

---

(١) لا يتفق كل علماء الأعصاب مع ذلك، من أجل دحض واضح وذكي للمقاربة الاختزالية أنصح بالتالي: Raymond Tallis, Aping Mankind: Neuromania, Darwinitis, and the Misrepresentation of Humanity (Routledge Classics, London, 2016). For alternative 'top-down' arguments, see George Ellis, How Can Physics Underlie the Mind: TopDown Causation in the Human Context (Springer-Verlag, Berlin, 2016).

من أجل البشر. في يوليو ٢٠١٢ اجتمعت مجموعة عالمية بارزة من علماء أعصاب الإدراك وعلماء الأدوية العصبية وعلماء الفسيولوجيا العصبية وعلماء التشريح العصبي وعلماء علوم الأعصاب الحاسوبية في جامعة كامبريدج في إنجلترا؛ اتفقوا بعد بعض المداولات على إعلان كامبريدج عن الوعي الذي ينص على[١]:

«تميل كفَّة الأدلة نحو الإشارة إلى أن البشر لا يتفردون بامتلاك اللبنات العصبية التي تخلق الوعي، تمتلك حيواناتٌ من دون البشر هذه اللبنات العصبية، تتضمن هذه الحيوانات الثدييات كلها والطيور والكثير من المخلوقات الأخرى بما في ذلك الأخطبوط».

هل القطط واعية؟ يطرح إعلان كامبريدج أنها واعية. ومرة أخرى قد تنجو قطة شرودنجر من شقاء أن تكون حية وميتة معًا، لقد تحدَّد مصيرها بالفعل (عن طريق وعيها) قبل أن ترفع غطاء الصندوق وتنظر. يجيب هذا بدرجة ما عن التحدي الذي أثاره بيل، لا تحتاج إلى درجة الدكتوراه كي تتسبب في انهيار دالة موجية، لا تحتاج إلا أن تكون يقظًا.

ووفق الإجماع الواسع الحالي، فإن العقل البشري جاء نتيجة ضغوط انتخاب تطورية، وهو ما قاد إلى الإنسان العاقل Homo Sapiens عن طريق التأسيس لحلقاتٍ من التأثيرات الراجعة بين السعة العصبية المتزايدة والتكيفات الجينية والتغيرات التشريحية، وهو ما دفع نحو تطوير القدرات اللغوية وبناء المجتمعات، هذه هي فرضية المخ الاجتماعي social brain hypothesis. يؤرخ علماء الحفريات

(١) Cambridge Declaration on Consciousness, 7 July 2012.

البشرية «للحظة التنوير» البشري على وجه الخصوص قبل ٤٠,٠٠٠ إلى ٥٠,٠٠٠ عامٍ مضت، هذه هي لحظة القفزة العظيمة إلى الأمام، أو لحظة «الثورة البشرية»، لحظة إزهار الابتكار والإبداع البشريين متضمنة الانتقال إلى ما يُعرف بالحداثة السلوكية.

يأتي الوعي في هذا «النموذج المعياري» نتيجة عمليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية مُضَمَّنة في التطور. تنتج الخواص الإجمالية للماء (يتجمد عند ٠° سيليزية ويغلي عند ١٠٠° سيليزية) عن الخواص الفيزيائية للكواركات العلوية والسفلية والجلونات والإلكترونات، إلا أننا نتعرض لعنتٍ شديدٍ عندما نتوقع أن الخواص الإجمالية للماء تنبني على ما نعرفه حاليًّا عن خواص الكواركات والجلونات والإلكترونات. لذلك فالوعي هو نتيجة (غير متوقعة وغير قابلة للتوقع) لمحتوى الكون من المادة التقليدية، وقد نشأ عندما ربطنا بلايين الأعصاب معًا من أجل خلق شبكة واسعة في المخ، ومن ثم إجراء بلايين الحسابات المعقدة من خلالها، لم يكن الوعي على نحو ما «سابق الوجود».

مع ذلك، ماذا لو احتوى الكون دائمًا على حوادث فيزيائية، هي -من منظور ما- «ذرات» للوعي الذي وُجِد قبل البيولوجيا بزمنٍ طويلٍ؟ ماذا إذا كانت إحدى نتائج التطور حشد هذه الحوادث «الذرية» والتوفيق بينها والمزاوجة بينها في نشاطٍ، يحدث داخل الأعصاب في المخ، ما يؤدي إلى ما نعرفه باسم الوعي؟ ماذا لو ارتبطت الحوادث موضع البحث بانهيار الدالة الموجية الذي يتميز بأنه غير قابل لإجراء الحسابات عليه؟ من ثم يصبح عندنا ما أطلق عليه بنروز وبروفيسور التخدير بجامعة أريزونا

ستيوارت هاميروف «الاختزال الموضوعي المُنَسَّق» orchestrated objective reduction أو Orch-OR، وهو أطروحة تسعى إلى تأسيس كمي للوعي.

يرجع هذا التصور إلى تسعينيات القرن العشرين، وطوَّره بنروز وهاميروف بشكلٍ منفصلٍ قبل أن يختارا جمع جهودهما والتعاون. قارب بنروز المعضلة من منظور الرياضيات، وهو ما لا يدعو إلى الاندهاش. يدافع بنروز في كتابه «عقل الإمبراطور الجديد» عن دور جوهري للوعي في الفهم البشري للصدق الرياضي، وهو دور يمضي إلى ما هو أعمق من الحسابات. كتب: «علينا أن «نرى» الصدق في البرهان الرياضي كي نقتنع بسلامته، هذه «الرؤية» هي جوهر الوعي»[1]. وهو ما يتسق تمامًا مع جزم فون نيومان بأن الوعي «يبقى خارج الحسابات».

لقد رأينا في الفصل السابق بالفعل أن بنروز طرح في الكتاب نفسه حججًا تدافع عن دورٍ لكثافة المادة - الطاقة المحلية وانحناء الزمكان في انهيار الدالة الموجية، وهو ما أصبح معروفًا بعد ذلك بنظرية ديوسي - بنروز.

ورغم إقناعه لنفسه بأن الوعي في جوهره يأتي نتيجة عملية غير حسابية من نوعٍ ما، ورغم طرحه كذلك آلية لانهيار الدالة الموجية، فإنه لم يكن قادرًا على إقامة الرابط بعد، إذ افتقر إلى آلية فيزيائية تسمح للأحداث الكمية بطريقة ما بالتحكم بالنشاط العقلي وإقراره ومن ثم

(١) Roger Penrose, The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics (Vintage, London, 1990), p. 540.

التحكم بالوعي وإقراره[1]:

«مع ذلك قد يفترض الواحد أنه قد يعثر على خلايا في عمق المخ حساسة لكمٍّ مفرد، إذا ثبت أن الأمر على هذه الصورة، فسوف تكون ميكانيكا الكم مُضمَّنة بشكلٍ كبيرٍ في نشاط المخ».

عرف هاميروف أين ينظر، طرح مع ريتشارد وات من قسم الهندسة الكهربية بجامعة أريزونا في عام ١٩٨٢ دورًا لبوليمرات بروتينية محددة في معالجة المعلومات في المخ، يُطلق عليها الأنبيبات الدقيقة. توجد هذه البنى داخل كل الأنظمة الخلوية المعقدة، بما في ذلك الأعصاب[2]. بسمح الاحتشاد الذاتي للبوليمرات بتكوين وصلاتٍ متشابكة بين الخلايا العصبية، كما يساعد في تنظيم قوى هذه الوصلات من أجل دعم الوظائف الإدراكية. صاغ هاميروف ووات نظرية تذهب إلى أن وحدات البوليمرات التركيبية (بروتينات كروية الشكل تُدعى تيوبيولين) تخضع لاستثارات مترابطة، مشكلة أنماطًا تدعم معالجة المعلومات بصورة تشبه كثيرًا الترانزيستور في الكمبيوتر.

ثمة اعتقادٌ عام بأن معالجة المعلومات في المخ تقوم على التحويل بين التشابكات. يوجد في المتوسط ١٠٠٠ تشابكٍ لكل خلية عصبية، يقدر كلٌّ منها على إجراء ١٠٠٠ عملية تحويل في الثانية الواحدة. للمخ البشري في المتوسط مئة بليون خلية عصبية، وبالتالي قدرة على إجراء ١٠١٧ عملية حسابية في الثانية الواحدة. إلا أنه بوجد ١٠ مليون وحدة

---

(١) Ibid., p. 517

(٢) وُجِدت كذلك في بعض الخلايا البسيطة بدائية النواة.

تيوبيولين تركيبية في كل خلية، قادرة على التحويل على نحوٍ أسرع بمليون مرة، مُوَلِّدة ١٠١٦ عملية حسابية في الثانية الواحدة في الخلية الواحدة. إذا كانت معالجة المعلومات تحدث هنا بالفعل، فإن هذا يطرح زيادة في عدد العمليات التي تُجرى في الثانية الواحدة ليصل إلى ١٠٢٧ بزيادة عشرة قيم أسية.

تمتلك وحدات التيوبيولين التركيبية فصَّين متمايزين، يتكوَّن كلٌّ منهما من ٤٥٠ حمضًا أمينيًّا تقريبًا، يمكن لكل وحدة تركيبية أن تتخذ «شكلين» مختلفين على الأقل -ترتيبين مختلفين لذراتها في المكان- ويصاحب ذلك توزيعان مختلفان قليلًا لكثافة الإلكترونات، التي تُوَلِّد قوى ضعيفة بعيدة المدى بين الوحدات المتجاورة، يطلق عليها قوى «فان دير فالس». يُعتَقد أن هذه القوى مهمة من أجل تسهيل التحول بين الأشكال، الذي هو أساس العملية الحوسبية.

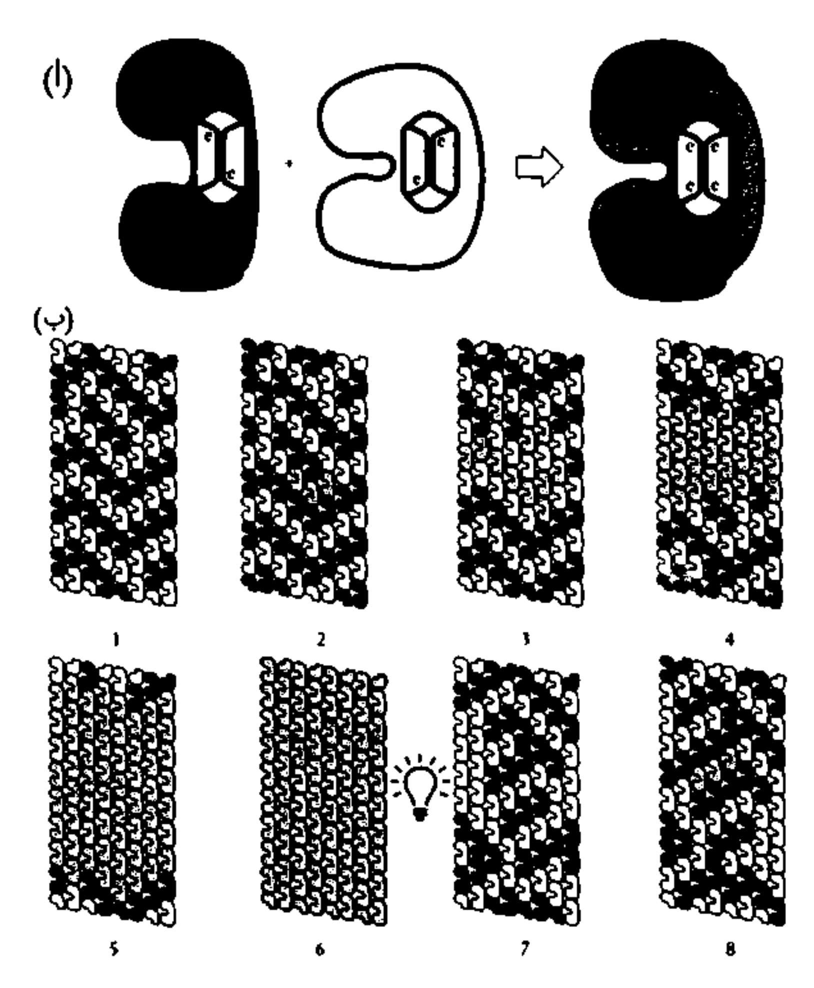
كان هاميروف مقتنعًا من البداية بالعلاقة بين الأنبيبات الدقيقة وبين الوعي، لأسبابٍ عديدة على رأسها التأثير المُعَطِّل الذي تبذله عليها مجموعة عريضة جدًّا من عقاقير التخدير المختلفة. طرح مع وات في عام ١٩٨٣ أن عقاقير التخدير الكيميائية تتسرَّب إلى داخل الخلايا العصبية، تشوش على قوى فان دير فالس بين الوحدات التركيبية للتيوبيولين، توقف العمليات الحوسبية، وبالتالي توقف وعي المريض.

تواصل هاميروف مع بنروز عندما قرأ كتاب «عقل الإمبراطور الجديد» واتفقا على التعاون. عندما نشر بنروز في عام ١٩٩٤ كتابه التالي «ظلال العقل» Shadows of the Mind كانت نظرية بنروز – هاميروف الاختزال الموضوعي المُنَسَّق Orch-OR قد ترسَّخت تمامًا.

إن أبعاد كل وحدة تركيبية للتيوبيولين ٨ × ٤ × ٤ جزءًا من بليون جزءٍ من المتر. ترتبط معًا في سلاسل بوليمرية، تُكَوِّن عواميد، يلتف ١٣ عمودًا معًا من أجل تكوين أنبوب مُفَرَّغ - الأنبيبية الدقيقة. بعد ذلك تجتمع هذه الأنبيبات الدقيقة مع شبكة من الخيوط المترابطة كي تُشَكِّل الهيكل الفيزيائي الداعم للخلية العصبية، الذي يطلق عليه الهيكل الخلوي.

تتضمن آلية الاختزال الموضوعي المُنَسَّق Orch-OR تكوين تراكب كمي بين شَكلَيْ التيوبيولين المختلفين، كما هو مُصَوَّر في شكل ١٦ أ. تتفاعل الوحدات التركيبية مع الوحدات المجاورة لها في نمطٍ تعاوني، سامحة بتراكبات كمية مترابطة وممتدة عبر الأنبيبية الدقيقة. وهو الأمر المُوَضَّح في الخطوات من ١ إلى ٦ في الشكل ١٦ ب، إلا أن الأنبيبات الدقيقة في الشكل مبسوطة ومسطحة. لتراكبات الوحدات التركيبية المنفردة لونٌ رمادي في هذا الشكل. عندما ينبني التراكب الممتد، يمرر حدًّا أدنى، يتعيَّن بواسطة كثافة المادة المحلية (وبالتالي انحناء الزمكان المحلي) بحسب نظرية ديوسي - بنروز. تنهار الدالة الموجية الممتدة وتعود الوحدات التركيبية للتيوبيولين إلى حالاتها الكلاسيكية. وهذا هو الانتقال بين الخطوتين ٦ و٧، وبحسب نظرية الاختزال الموضوعي المُنَسَّق، يحدث الوعي في هذا الموضع (التنوير)، ثم تبدأ العملية كلها من جديد.





شكل رقم ١٦ تقوم نظرية بنروز – هاميروف الاختزال الموضوعي المُنَسَّق Orch-OR على أن الوحدات التركيبية للتيوبيولين في سلاسل البوليمرات التي تُشَكِّل الأنبيبات الدقيقة داخل الخلايا العصبية يمكنها الدخول في تراكب كمي لحالتين شكليتين مختلفتين (أ). تتفاعل الوحدات التركيبية مع جيرانها، وينشأ تراكبٌ مترابطٌ عبر الأنبيبة الدقيقة، مُوضَّحًا في الخطوات من ١ إلى ٦ في (ب). عندما يصل التراكب الكمي إلى كثافة الكتلة الحرجة، تنهار الدالة الموجية (الخطوتان ٦ و٧)، وهو ما يمدُّ بخبرة واعية.

لا يقدِّم هذا الوصف المبسَّط كثيرًا الآلية كما يجب. لكنني أظن أن عليك إدراك أن الأمر برمته قائمٌ على التخمين بصورة كبيرة، يقوم على دمج تصورات من أهداب فيزياء الكمِّ ومن علم الأعصاب (ومن الفلسفة كذلك بالطبع). ومن غير المفاجئ تعرُّض الأطروحة لانتقادات شديدة من قِبَل الفيزيائيين وعلماء الأعصاب كليهما.

ربما تتعلَّق أبرز قضايا الأطروحة بإمكانية الإبقاء على تراكبات كمية مترابطة في بنى جزيئية كبيرة. وكما رأينا في الفصل الثامن، خُلِّقت في المعمل بنجاحٍ تراكبات كمية تتضمن بنى متوسطة تقع بين تلك البنى الكمية والكلاسيكية، كما تضمنت تلك التراكبات جزيئات عضوية تحتوي على ٤٣٠ ذرة. من العادل أن نقول إننا لا نعرف أين يقع الحد الأقصى بعد، إلا أنه كلما كبر حجم النظام، أصبحت حمايته من تأثيرات فك الارتباط الناجم عن البيئة أصعب، وهذا هو السبب وراء أن MAQRO مهمة فضائية.

إلا أن كل وحدة تركيبية للتيوبيولين عبارة عن بنية بروتينية تحتوي على ما يزيد على عشرة آلاف ذرة[1]. يتراوح طول الأنيبيات الدقيقة بين ٢٠٠ جزء و٢٥,٠٠٠ جزء من بليون جزء من المتر. يستلزم أقصر

(١) استعمَلت محاكاة حاسوبية حديثة للديناميكيات الجزيئية لثنائي فوسفات الجوانوزين (GDP) المرتبط بالتيوبيولين بنية تتركب من ١٣,٤٣٢ ذرة، من دون عد ١٥٠,٥١٠ جزيء من جزيئات الماء التي تحيط بها وتذيبها. انظر: Yeshitila Gebremichael, Jhih-Wei Chu, and Gregory A. Voth, 'Intrinsic Bending and Structural Rearrangement of Tubulin Dimer: Molecular Dynamics Simulations and Coarse-Grained Analysis', Biophysical Journal, 95 (2008), 2487–99.

أطوال الأنبيبات عمودًا بوليمريًا من ٢٥ وحدة تركيبية فقط، ويستلزم ١٣ عمودًا أنبيبية دقيقة تتكوَّن من ٣٢٥ وحدة تركيبية في المجمل، ومن ثم تتطلب آلية الاختزال الموضوعي المُنَسَّق Orch-OR تراكبًا كميًّا مترابطًا يمتد على طول بنية تتكون من ٣٢٥,٠٠٠ ذرة تقريبًا، ويجب الإبقاء عليه لمدى زمني قدره ميللي ثانية قبل الانهيار. قارن هذا بالمواد الماكروسكوبية المطروحة من أجل مهمة MACRO، وهي «كرات نانوية» صغيرة، لها أقطارٌ تقدَّر ب ١٠٠ جزءٍ من بليون جزءٍ من المتر.

يبدو أن الإبقاء على تراكب كمي مترابط في بيئة «دافئة ومبللة وصاخبة» أمرٌ بعيد المنال، وهكذا هي بيئة الخلايا العصبية في مخ نشيط. في عام ٢٠٠٠ ذهب المُنَظِّر ماكس تيجمارك إلى أن الجدول الزمني لفك الارتباط في بيئاتٍ على هذه الشاكلة يتراوح على الأرجح بين عشر الواحد على التريليون (١٠^-١٣) من الثانية وبين واحد على مئة من واحد على مليون من واحد على تريليون (١٠^-٢٠) من الثانية[1].

إلا أنه علينا مرة أخرى ألا نقلِّل أبدًا من قدرة التفسير الواقعي المتسق مع الفرضية #٤ على الإلهام وإثارة الاهتمام. وعلى الرغم من طبيعة نظرية بنروز – هاميروف Orch-OR التخمينية، فإن لها مكونات في متناول التجريب، ومن الممكن القول إنها تقدِّم تنبؤات عديدة قابلة للاختبار. قام هاميروف وبنروز في تحديثٍ قريبٍ للنظرية في عام ٢٠١٤ بمراجعة وضعها، إذ فحصا كيف نجح ٢٠ توقعًا للنظرية قدَّماها في عام

(١) Max Tegmark, 'The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes', Physical Review E, 61 (2000), 4194–206. See also arXiv:quant-ph/9907009v2, 10 November 1999.

١٩٩٨ في غضون ذلك الوقت. استكانا كثيرًا لاكتشاف حديثٍ قامت به مجموعة بحثية يقودها أنيربان بانديوبادهياي في المعهد الوطني لعلوم المادة في اليابان بخصوص تحويل - الذاكرة في أنيبية مخية مفردة[١]، استنتجا أن النظرية نجحت فعليًّا على نحوٍ جيدٍ، إذ تقدم «طرحًا علميًّا حيويًّا، يهدف إلى توفير فهمٍ لظاهرة الوعي»[٢].

ولسنا بحاجة إلى أن نقول إن مُكَوِّن النظرية الذي لا يوجد عليه دليلٌ تجريبيٌّ بعد هو آلية ديوسي - بنروز للاختزال الموضوعي. ولا يزال إلى الآن أي دورٍ محتمل لانهيارٍ غير حسابي للدالة الموجية في تسهيل الوعي عالقًا على شواطئ الواقع الميتافيزيقي.

يذهب شالمر إلى أننا حتى لو استطعنا في يومٍ من الأيام العثور على دليلٍ على صلة بين ميكانيكا الكمِّ والوعي، فلن يحل ذلك المعضلة الصعبة: «عندما نصل إلى تفسير الخبرة، فإن العمليات الكمية في القارب نفسه، مثلها مثل أي عمليات أخرى. لا يزال السؤال عن الكيفية التي تُنشئ بها هذه العمليات الوعي غير مجاب عنه على الإطلاق»[٣].

---

(١) Satyajit Sahu, Subrata Ghosh, Kazuto Hirata, Daisuke Fujita, and Anirban Bandyopadhyay, 'Multi-level Memory-Switching Properties of a Single Brain Microtubule', Applied Physics Letters, 102 (2013), 123701.

(٢) Stuart Hameroff and Roger Penrose, 'Consciousness in the Universe: A Review of the "Orch-OR" Theory', Physics of Life Reviews, 11 (2014), 70.

24. Chalmers, 'Facing up to the problem of consciousness', pp. 200–19.

(٣) Chalmers, 'Facing up to the problem of consciousness', pp. 200–19..

الفصل العاشر

ميكانيكا الكم غير مكتملة

لأن...

حسنًا، إنني أستسلم

المشهد من خاريبدس: إيفرت والعوالم المتعددة والكون المتعدد

لعلَّكَ تستنتج من العنوان الذي اخترته لهذا الفصل الأخير، أنني غير مفتونٍ أبدًا بالتفسيرات التي سوف نهتم بها هنا. هذا صحيحٌ بالتأكيد، إلا أن غاية طموحي مع ذلك ألا أجعل الأمور تجري في صالح هذه التفسيرات أو ضدها، سأبذل قصارى جهدي في سبيل ذلك، ويمكنك الحكم بنفسك. وبينما نمضي قدمًا سوف أوضِّح مشكلاتي مع هذه التفسيرات.

بغض النظر عمَّا أعتقد، فإنني لم أتوقَّف عن الاندهاش أبدًا من أن أحد أبسط حلول معضلة انهيار الدالة الموجية يقود إلى أحد أكثر الاستنتاجات غرابة في كل ميكانيكا الكم، إن لم يكن في كل الفيزياء. يتضمَّن هذا الاستنتاج في البداية إدراك أننا لا نملك أي دليلٍ على الإطلاق يعضد الانهيار. لقد طرح فون نيومان الانهيار كفرضية أولية. كنَّا قد رأينا أنظمة كمية في مراحل متنوعة من الترابط، كما استطعنا

خلق تراكبات بين أشياء متوسطة الحجم تقع أحجامها بين تلك الكمية والكلاسيكية، إلا أننا لم نرَ أبدًا إلى الآن نظامًا وهو ينهار، ولم نرَ كذلك تراكبًا كميًّا لأجسامٍ كبيرة في حجم القطة. لم يزِد مفهوم الانهيار في أي تفسيرٍ واقعي للدالة الموجية عن أن يكون أداة مرتجلة تحملنا من نظامٍ نُجبَر على صياغته في صورة تراكب لنتائج قياس محتملة إلى نظامٍ له نتيجة مفردة.

ثمة سببٌ آخر لمساءلة الحاجة إلى الانهيار، أتيتُ على ذكره بالفعل بينما نمضي في الفصل السادس، وهو على صلة بالعلاقة بين نظرية الكم وبين الزمكان كما وصفته نظرية أينشتاين النسبية العامة.

طرح أينشتاين النظرية العامة في سلسلة من المحاضرات التي ألقاها في الأكاديمية البروسية للعلوم في برلين، بلغت ذروتها في محاضرة أخيرة مظفرة في ٢٥ نوفمبر ١٩١٥. إلا أنه عاد إلى الأكاديمية في خلال شهورٍ قليلة، وأوصاهم أن نظريته الجديدة عن الجاذبية بحاجة إلى التعديل: «يبدو أن نظرية الكم لن تُعَدِّل في الديناميكا الكهربية لماكسويل فقط بل في نظرية الجاذبية الجديدة كذلك»[١].

بدأ ليون روزنفيلد –مريد بور– محاولاتٍ لبناء نظرية كمية للجاذبية

---

(١) Albert Einstein, 'Approximative Integration of the Field Equations of Gravitation', Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin) Sitzungsberichte, 1916, 688–96. Quoted in Gennady E. Gorelik and Viktor Ya. Frenkel, Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties (Birkhäuser Verlag, Basel, 1994). The quote appears on p. 86.

في عام ١٩٣٠. وكما أوضحتُ في الفصل الخامس، ثمة ثلاث «طرق» يمكن أخذها، يتضمن أحدها تكميم الزمكان في النسبية العامة، ويقود إلى بنى على غرار الجاذبية الكمية الحلقية، والنتيجة نظرية كمٍّ للمجال الجذبوي ونظرية كمٍّ للزمكان نفسه كذلك.

من غير الممكن التقليل من قدر الصعوبات. تُصاغ ميكانيكا الكم أمام خلفية زمكان مفترَضة، نتصوره بشكلٍ لا يختلف كثيرًا عن المكان والزمان المطلقين في ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية. تعتمد ميكانيكا الكم على الخلفية، وفي المقابل، زمكان النسبية العامة ديناميكي. هندسة الزمكان متغيرة: تنشأ نتيجة للتفاعلات الفيزيائية التي تتضمن الكتلة – الطاقة. تعتمد النسبية العامة على الخلفية.

يصيبنا هذا الاختلاف في طريقتيْ تصور المكان والزمان بصداعٍ فعلي عند أي تفسير واقعي للدالة الموجية.

نتعامل مع نظام كمي في ميكانيكا الكم في روتينية باعتباره داخل صندوق، معزولًا عن العالم الخارجي، وهو العالم الذي نفضِّل ألا نُعنى به من أجل التبسيط. نطبق معادلة شرودنجر داخل هذا الصندوق، وتتطور الدالة الموجية للنظام في سلاسة واتصال، بينما تتحرك في الزمن من مكان إلى مكان وهي منتشرة وموزعة ولا محلية (غير متمركزة). إنها المسلَّمة #٥ أو عملية فون نيومان ٢. يكفي هذا، نحوِّل انتباهنا الآن نحو جهاز القياس الكلاسيكي، الذي يقع في العالم خارج الصندوق. عندما يتفاعل الجهاز مع نظامٍ كميٍّ نفترض أن الدالة الموجية انهارت بحسب العملية ١.

كيف ننوي تطبيق هذا المنطق على زمكان كمي؟ بعيدًا عن بعض التأثيرات «الشبحية» اللا محلية، يمكننا اعتبار نظامٍ كمي يتكون من جسيم مادي أو من فرقة من الجسيمات موجودًا في العموم «هنا»، في هذا الموضع من الكون، وهو بذلك داخل صندوق. يتعين الصندوق بحدود متخيلة في الزمكان، إلا أننا إذا أخذنا في الاعتبار الزمكان نفسه بكامله، لا يمكننا تخيل مثل هذه الحدود. إن نظرية كم للزمكان هي بمثابة نظرية للكون كله أو نظرية كونيات كمية - وذلك بحسب التعريف.

في أي تفسيرٍ واقعي للدالة الموجية، تؤدي الحاجة إلى استحضار عملية منفصلة «للقياس» إلى فوضى كبيرة بالفعل، إذ إن هذا يفترض بالضرورة منظورًا يقع خارج النظام الذي يُجرى عليه القياس، وبقدر ما نعرف، قد لا يكون هناك شيء خارج الكون. جذبت هذه المعضلة انتباه هيو إيفرت الثالث، خريج الهندسة الكيميائية، تحوَّل أولًا نحو دراسة الرياضيات (بما في ذلك نظرية الألعاب العسكرية) في جامعة برينستون، ثم تحوَّل في عام ١٩٥٥ نحو دراسة الدكتوراه في الفيزياء، تحت إشراف جون ويلر. في عام ١٩٥٧ كتب في ورقة بحثية تقوم على أطروحته[1]:

---

(١) Hugh Everett III, ' "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics', Reviews of Modern Physics, 29 (1957), 454–62. This is reproduced in John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek (eds), Quantum Theory and Measurement (Princeton University Press, Princeton, NJ), 1983, pp. 315-23. This quote appears on p. 316. ينبغي لي أن أشير إلى أن إيفرت ترك الحياة الأكاديمية والتحق بمجموعة تقييم نظام التسليح التابعة للبنتاجون في يونيو ١٩٥٦، وعلى الرغم من أن هذه الورقة البحثية لا تحمل اسم ويلر فإنها تمثِّل تسوية، لم يكن إيفرت راضيًا عنها تمامًا أبدًا.

«من الواضح أنه لا سبيل إلى تطبيق الصياغة المعتادة لميكانيكا الكم على نظامٍ غير معرض لرصدٍ خارجي. يستقر المخطط التفسيري بالكامل لهذه الصياغة على مفهوم الرصد الخارجي».

وهكذا بعد أن أدركنا المعضلات التي يخلقها الانهيار، والافتقار إلى أي دليلٍ مباشر بخصوصه، لماذا لا نتخلّص ببساطة منه؟ أوضحتُ سابقًا أن العلماء تحلّوا بعادة مفيدة على مرِّ الزمن، إذ خلّصوا نظرياتهم من كل ما هو بالٍ ومن كل بهرجة غير ضرورية، حيث تسلّلت من أجل إرضاء تصورات ميتافيزيقية معينة، إلا أنها في النهاية غير مدعومة بحقائق تجريبية. وهذا ما اختار إيفرت القيام به، انقاد في أطروحته إلى منطق نيومان، وافترض أن ميكانيكا كم العملية ٢ تنطبق بالدرجة نفسها على المقاييس الحجمية الكبيرة، وعلى الأجسام الكلاسيكية، وقدّم التفسير البديل التالي[١]:

«أعتقد في الصحة العامة للوصف الكمي القائم على التخلص الكامل من العملية ١. أذهب إلى الصحة العامة للميكانيكا الموجية الخالصة من دون أي فرضيات إحصائية، إذ تنطبق على كل الأنظمة الفيزيائية، بما في ذلك الراصدين وأجهزة القياس. توصَف العمليات الرصدية بالكامل من خلال الدالة (الموجية) للنظام المركب الذي يتضمن الراصد والنظام الموضوعي، والذي يطيع في كل الأوقات معادلة (شرودنجر) الموجية».

---

(١) Hugh Everett III, 'The Theory of the Universal Wave Function', Princeton University PhD Thesis. This is reproduced in B. S. DeWitt and N. Graham (eds), The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics (Pergamon Press, Oxford, 1975)

يبدو هذا الطرح للوهلة الأولى غير مثمرٍ نوعًا ما. إذا كانت خبرتنا تملي علينا حقًّا أن المؤشرات تشير إلى اتجاه واحدٍ فقط في المرة الواحدة، وأن القطط إما حية وإما ميتة، إذن يبدو أن هجر الانهيار يأخذنا نحو الوجهة الخاطئة. تواجهنا بالتأكيد ارتدادات شرودنجر اللا نهائية، نصطدم بتعقيدٍ لا حدَّ له من تراكباتٍ لأجهزة قياس وقطط وراصدين بشرٍ في النهاية.

إلا أننا لا نختبر أبدًا بالطبع تراكبات أجسام كلاسيكية ذات مقاييس حجمية كبيرة. ذهب إيفرت إلى أن السبيل الوحيد للخروج من هذا التناقض يتمثَّل في افتراض أن نتائج القياس الممكنة كلها تتحقق.

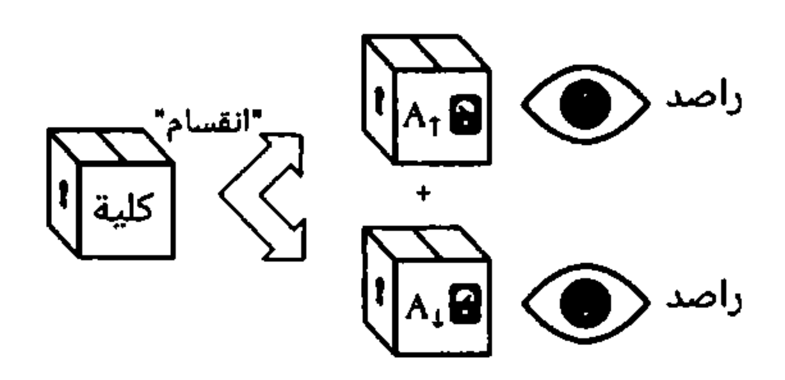
كيف يمكن لهذا أن يحدث؟ مرة أخرى، من الأسهل تتبُّع منطق إيفرت باستخدام مثال، لذلك دعنا نعود -لآخر مرة- إلى جسيمنا الكمي A المُعَدّ في تراكب لحالتيْ لفٍّ مغزلي ↑ و↓. تقابل الدالة الموجية الكلية جهاز قياس، ويتطور النظام الأكبر في سلاسة إلى تراكب للنتيجتين A↑ وA↓. يستحث هذا استجابة من العداد المثبت إلى جهاز القياس، وتتشابك النتيجتان مع «حالتيْ مؤشر» العداد كما جرى في السابق، وهو ما يؤدي إلى تراكب كمي للحالتين A↑، مؤشر إلى اليسار وA↓، مؤشر إلى اليمين. إلا أن هذا لم يعد نوعَ التراكب الذي نهتم به هنا. كتب إيفرت في أطروحته[1]:

«بينما كانت لدينا قبل القياس حالة مفردة للراصد، صار لدينا بعد

(1) Everett, 'The Theory of the Universal Wave Function', footnote on p. 68. Italics in the original.

القياس عددٌ من الحالات المختلفة للراصد، تحدث جميعها في تراكب، إن كل حالة من هذه الحالات المنفصلة هي حالة راصد، وعلى ذلك يمكننا الحديث عن راصدين مختلفين، تصفهم حالات مختلفة. على الجانب الآخر، يتضمن الأمر النظام الفيزيائي نفسه، ومن هذا المنظور فهو الراصد نفسه، في حالات مختلفة لعناصر التراكب المختلفة (أي أن لديه خبرات مختلفة في عناصر التراكب المختلفة)».

لم يكن إيفرت يطرح أن الراصد يدخل تراكبًا واعيًا من نوع ما، تُختبَر نتيجتا القياس فيه في الوقت نفسه، بل «ينقسم» الراصد بدلًا من ذلك بين حالتين مختلفتين. في مثالنا، يقابل أحد هذين الراصدين الخبرة ب A↑، ويقابل الآخر الخبرة ب A↓.



لم يكن إيفرت واضحًا بخصوص طبيعة «الانقسام» أو سببه، إلا أن ثمة دليلًا في كتاباته يشير إلى أنه فَسَّره حرفيًّا تمامًا واعتبره ظاهرة فيزيائية، يعمل على دالة موجية واقعية (أو تعزِّزه دالة موجية واقعية). أما ويلر فكان أكثر حرصًا، واستدرك على إحدى مخطوطات إيفرت بتعليق، كتب فيه،

«انقسام؟ نحتاج إلى كلماتٍ أفضل»، كما أوصى بأن يعيد إيفرت صياغة حججه من أجل اجتناب «التفسيرات الغرائبية الخاطئة التي قد يهرع إليها الكثيرُ للغاية من القراء غير المحنكين»[1].

هذا هو تفسير «الحالة النسبية» لإيفرت، وقد جاء استخدام كلمة «النسبية» من الارتباطات التي تتأسَّس بين عنصري التراكب في الدالة الموجية الكلية وبين الخبرتين المختلفتين للراصد عقب الانقسام. تتوافق واحدة من حالتي الراصد مع A↑ والأخرى مع A↓ بالنسبة إلى الأولى. لذلك ذهب إيفرت إلى أن الاحتمالية الكمية ليست إلا احتمالية ذاتية، يفرضها راصدٌ يلاحظ عشوائية نتائج سلسلة من الأرصاد التي تُجرى على جسيمات A مُعدَّة في تماثل، كما يلاحظ أن احتمالية رصد ↑ أو ↓ ٥٠ : ٥٠. كتب إيفرت: «من ثم يقودنا هذا إلى وضعٍ جديدٍ، فيه النظرية الأساسية متصلة وسببية موضوعيًّا وغير متصلة واحتمالية ذاتيًّا»[2].

وعلى الرغم من تحفظات ويلر على بعض صياغات إيفرت، فإنه أرسل أطروحته إلى بور، كما زاره بعد ذلك في كوبنهاجن، في محاولة منه لكسب دعم بور لمقاربة كان يرى أنها مبشِّرة. تكلَّلت هذه المساعي بزيارة من إيفرت نفسه في مارس ١٩٥٩، إلا إن ذلك كله كان بلا جدوى. كان بور طوال الوقت مشغولًا بحسن استغلال اللغة وسوء استغلالها في الصياغات الفيزيائية، ولم تكن في نيَّته مناقشة «أي نظرية جديدة (غريبة)

---

(١) Stefano Osnaghi, Fábio Freitas, and Olival Freire Jr, 'The Origin of the Everettian Heresy', Studies in the History and Philosophy of Modern Physics, 40 (2009), 111.

(٢) Everett, 'The Theory of the Universal Wave Function', p. 9.

مُحدَثة»[1]. تتحدَّى مقاربة إيفرت عناصر عديدة للغاية في مذهب كوبنهاجن، مثل تكامل الموجات والجسيمات وتفسير الاحتمالية الكمية. ترفض مدرسة كوبنهاجن في صراحة أي طرح يذهب إلى أن ميكانيكا الكم يمكن تطبيقها على الأجسام الكلاسيكية.

كان إيفرت غير راضٍ. لقد مضى عليه في ذلك الوقت عامان ونصف بالفعل، وهو يعمل في مجموعة تطوير أنظمة التسليح التابعة للبنتاجون، ورفض محاولات ويلر لإغرائه بالعودة إلى الحياة الأكاديمية. دُعي إلى تقديم تفسير الحالة النسبية الخاص به في مؤتمر في عام ١٩٦٢، إلا أن المجتمع الفيزيائي تجاهل أفكاره بصورة كبيرة في ذلك الوقت.

كان ثمة استثناءٌ واحدٌ جديرٌ بالملاحظة.

فُتِن برايس ديويت بتحليل إيفرت وكتب له في عام ١٩٥٧ نقدًا طويلًا. تساءل ديويت، إذا انقسمت الحالة المرصودة في كل مرة نجري فيها الرصد، لماذا لا ينتبه الراصد لذلك؟ ردَّ إيفرت بتشبيه. لا نملك سببًا يجعلنا لا نُسائل استنتاجات الفلك والفيزياء الكلاسيكية التي تخبرنا أن الأرض تدور حول محورها بينما تدور حول الشمس، ومع ذلك لا نختبر هذه الحركة مباشرة بسبب قصورنا الذاتي. بالمثل، يحتفظ الراصد بشعورٍ بهوية واحدة وبتاريخٍ واحدٍ، يمكن بناؤه من الذكريات، ولا ينتبه لوجود نسخٍ عديدة منه، لكل منها ذكرياتها المختلفة لتسلسل الأحداث.

(١) Nancy G. Everett, letter to Frank J. Tipler, 10 October 1983. Quoted by Eugene Shikhovtsev, 'Biographical Sketch of Hugh Everett, III', available in an online version maintained by Max Tegmark: http:// space.mit.edu/home/tegmark/everett/everett.html

ضمَّ إيفرت هذه الحجة إلى براهين ورقته البحثية في عام ١٩٥٧، وأضافها كحاشية.

اقتنع ديويت وناضل من أجل القبول بعلم كونيات كمي، يبدو على خلاف مع الصياغة التي تضع الكثير من التشديد على «القياس» الخارجي. سعى ديويت إلى الإعلاء من مكانة تفسير إيفرت في ورقة بحثية نشرتها (الفيزياء اليوم) Physics Today في سبتمبر ١٩٧٠. تُوفي بور في عام ١٩٦٢، وربما ظهرت علامات تشير إلى أن تفسير كوبنهاجن قد بدأت تضعف قبضته الخانقة. ربما توصَّل ديويت إلى أن زمن السير بحيطة وحذرٍ واستعمال لغة سياسية قد وَلَّى، اختار أن يصف التفسير باستخدام كلمات، لم يكن الحرس القديم ليوافق عليها (بمن فيهم ويلر).

كتب: «سوف أركز على (تفسيرٍ) واحدٍ، يصوِّر الكون كأنما يواصل الانقسام باستمرارٍ إلى العديد من العوالم التي لا يمكن أن يرصد بعضها بعضًا، إلا أنها واقعية بالقدر نفسه، يعطي القياس في كل واحد منها نتيجة محققة»(١). وهكذا تحوَّل تفسير الحالة النسبية الخاص بإيفرت إلى تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم، وبين عشية وضحاها تقريبًا، تحوَّل تفسير إيفرت من أحد أكثر التفسيرات غموضًا، إلى أحد أكثر التفسيرات إثارة للجدل.

---

(١) Bryce S. DeWitt, 'Quantum Mechanics and Reality', Physics Today, 23 (1970), 30. This is reproduced in DeWitt and Graham (eds), The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics

بدا أن إيفرت كان راضيًا عن اختيار ديويت للكلمات[١]. نصحه ويلر ذات مرة أنه على الرغم من إيمانه (على الأغلب) بالتفسير، فإنه يحتفظ بثلاثاء في كل شهر كي يكفر به. إلا أن تحفظاته فيما يبدو كانت أكبر مما تفترضه هذه الطرفة، إذ بلغ به الأمر أن سحب دعمه للتفسير في وقتٍ من الأوقات، كما وافق بعد ذلك على أن التفسير «يحمل معه الكثير للغاية من الحمولات الميتافيزيقية» ويحوِّل «العلم إلى نوعٍ من العجائبيات»[٢]. إلا أنه بينما كان يبعد نفسه، اعترف بأن إسهام إيفرت أحد أهم الإسهامات وأكثرها أصالة منذ عقودٍ[٣].

حصل ديويت على نسخة من أطروحة إيفرت الأصلية من زوجته نانسي. في عام ١٩٧٣ نشرها ديويت مع ورقة إيفرت البحثية التي يعود تاريخها إلى عام ١٩٥٧ وذلك بمباركة من إيفرت وبمساعدة تلميذه نيل

---

(١) من المثير للانتباه أن ديويت في ورقة (الفيزياء اليوم) Physics Today البحثية ذهب إلى أن فرضية الانهيار الخاصة بفون نيومان جزءٌ من التفسير «المعتاد» أو تفسير «كوبنهاجن». إلا أن نظرية أساسية للقياس لم تكن أبدًا جزءًا من مذهب كوبنهاجن (وجد أبراهام بايز كاتب سيرة بور مدخلًا في أحد دفاتره القديمة، يتعلّق بمحاضرة ألقاها بور في نوفمبر ١٩٥٤، كُتِب فيه: «يعتقد (بور) أن مفهوم «نظرية كمية للقياس» قد صيغ بشكلٍ خاطئ» (انظر: Abraham Pais, Niels Bohr's Times, Oxford University Press, 1991, p. 435) في الحقيقة، لماذا يحتاج تفسيرٌ لا واقعي يرسم خطًّا بين العالَمين الكمي والكلاسيكي إلى نظرية كمية للقياس؟ إن التفسير «المعتاد» جيدٌ، إلا أن ديويت أساء طرح تفسير «كوبنهاجن» ويبدو -بالنسبة إليَّ على الأقل- أنه كان يسعى إلى شيطنته، ثمة المزيد بخصوص هذا الأمر فيما يلي في هذا الفصل.

(٢) John Wheeler, in P. C. W. Davies and J. R. Brown (eds), The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1986), p. 60.

(٣) J. A. Wheeler, letter to Paul Benioff, 7 July 1977. Quoted by Shikhovtsev, 'Biographical Sketch of Hugh Everett, III'

جراهام، ونشر معهما «تقييمًا» لورقة إيفرت البحثية، كتبه ويلر وكان منشورًا في المجلة نفسها التي نُشِرت فيها ورقة إيفرت، نُشِر كذلك معها مقال ديويت الذي كان قد نُشِر في (الفيزياء اليوم) ومقالان داعمان آخران لديويت وجراهام وليون كوبر وديبورا فان فيشتن. كان عنوان الكتاب (تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم) The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics.

لم تعد قطة شرودنجر حية وميتة في الوقت نفسه في العالم الواحد نفسه، إنها حية في عالم وميتة في عالم آخر. يتضاعف سريعًا عدد العوالم المنقسمة بعضها من بعض مع تكرار القياسات. لا يشغل فعل القياس موضعًا خاصًا في تفسير العوالم المتعددة، لذلك لا وجود لسببٍ يدعو إلى تمييز القياس عن أي عملية تتضمن تراكبًا كميًّا. يمكننا افتراض أن عددًا عظيمًا للغاية من مثل هذه العمليات قد حدثت منذ الانفجار العظيم في بداية الكون، منذ ١٣,٨ مليار عامٍ. يقسم كلٌّ منها العالم إلى عددٍ من التفرعات بقدر عدد المكونات في التراكبات المتنوعة التي تشكلت منذ ذلك الوقت.

قدَّر ديويت في مقاله في (الفيزياء اليوم) عدد التفرعات التي حدثت إلى الآن بأكثر من $١٠^{+١٠٠}$ تفرعًا مختلفًا أو عالمًا متمايزًا، يحتوي كل عالم من هذه العوالم على «نسخٍ مختلفة قليلًا من الواحد، تنقسم كلٌّ منها إلى نسخ أخرى، وتصبح في النهاية مختلفة تمامًا... ها هنا فُصام في أقصى درجاته»[١].

يُسَوَّق غالبًا لتفسير العوالم المتعددة من حيث إنه يُوَفي بمسألة اعتبار ميكانيكا الكم نظرية مكتملة لأنه لا يفترض إلا ميكانيكا متصلة، تصفها معادلة شرودنجر، ولا شيء أكثر من ذلك. إذا كان الأمر على هذه

(١) DeWitt, 'Quantum Mechanics and Reality', p. 33.

الصورة، إذن فالعنوان الذي اخترته لهذا الفصل غير صحيح، ولا حاجة بي إلى أن أقول إنني لا أتفق مع هذا. قد تكون النظرية مكتملة رياضيًّا في التفسير (وثمة الكثير من الحجج التي تحض على هذه النتيجة)، إلا أن التفكير في إكمال النظرية عن طريق استحضار عددٍ مهولٍ من العوالم الواقعية التي لا ترصد بعضها بعضًا مكلِّفٌ إلى حدٍّ ما، وليس «هباء» بالتأكيد. لقد لاحظنا أن تفسير العوالم المتعددة «بخيلٌ في افتراضاته، مسرفٌ في عوالمه»(١).

أحاطت رياح تجارية عنيفة بسفينة العلم، تندفع من دون هوادة نحو دوامة خاريبدس الخطيرة، دوامة الهراء الميتافيزيقي بخصوص طبيعة الواقع.

بُذِلت جهود عديدة من أجل إصلاح التفسير في السنوات التي تلت ذلك. لم يكن واضحًا ما الذي يوحي به انقسام العالم بخصوص حدود التداخل في التراكب الكمي، تحمَّس بيتر زيه لتطوير أفكار عن فك الارتباط، قصدَ إلى إحلال «الوعي المتعدد» أو ما صار يُعرف الآن باسم تفسير «العقول المتعددة» محلَّ مفهوم «العوالم المتعددة»(٢). حلَّ

---

(١) تُعزى هذه الملاحظة كثيرًا إلى جون ويلر، إلا أنني التقطتُها من المقابلة التي أُجريت مع ديفيد دويتش والتي ظهرت في Davies and Brown, The Ghost in the Atom, p. 84.

(٢) H. D. Zeh, 'The Problem of Conscious Observation in Quantum Mechanical Description', Foundations of Physics Letters, 13 (2000), 221–33. See also arXiv:quant-ph/9908084v3, 5 June 2000. Zeh explains that this paper is an update of a paper that was first informally circulated through the Epistemological Letters of the FerdinandGonseth Association in Biel, Switzerland, in 1981.

انقسام أو تفرُّع وعي الراصد محلَّ انقسام أو تفرع العوالم أو الأكوان. لا يعي الراصد التراكب الكمي أبدًا، إذ إن فك الارتباط الناجم عن البيئة المحيطة يدمر حدود التداخل (أو يثبطها على الأصح). يعي الراصد نتيجة واحدة، إلا أن النواتج الأخرى توجد في عقله، ومع ذلك يتعذَّر الوصول إلى هذه الحالات البديلة للوعي. باختصارٍ، لا يمتلك الراصد عقلًا مفردًا، بل عقولًا متعددة (أو ربما عددًا لا نهائيًّا من العقول)، يُرَجَّح كلٌّ منها بحسب سعة الدالة الموجية بحيث يسود أحدها.

تمنعنا المساحة من مناقشة تفسير العقول المتعددة بمزيدٍ من التفصيل، صكَّ اصطلاح «العقول المتعددة» الفيلسوفان ديفيد ألبرت وباري لوفير في عام ١٩٨٨. استكشف الفيلسوف مايكل لوكوود بشكلٍ مستقلٍّ العلاقة بين العقل - الجسد وبين ميكانيكا الكم، في كتابه «العقل والمخ والكم: المركب (أنا)» (Mind, Brain, the Quantum: The Compound I)[1]، الصادر في عام ١٩٨٩. يُقدِّم كتاب ألبرت الشهير «ميكانيكا الكم والخبرة» المنشور لأول مرة في عام ١٩٩٢، تفسير العقول المتعددة[2].

رأى جون بيل تشابهات كبيرة بين العوالم المتعددة وبين نظرية دي برولي - بوم، ذاهبًا إلى أنه من الممكن توفيق تفسير إيفرت مع نظرية الموجة الدليلية، من دون مساراتٍ جسيمية. من هذا المنظور، لا يعتبر الانقسام أو

---

(١) Michael Lockwood, Mind, Brain and the Quantum. The Compound 'I' (Blackwell, Oxford, 1990).

(٢) David Z. Albert, Quantum Mechanics and Experience (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1992).

«التفرع» الذي تستلزمه العوالم المتعددة أكثر تطرفًا من «الموجات الفارغة» في نظرية دي برولي – بوم. اعتبر بيل -مثله مثل ويلر- أن التضاعف اللا نهائي للعوالم أمرٌ مبالغٌ فيه ومجاوز لكل الحدود، ذاهبًا إلى أنه لا يخدم أيَّ هدفٍ فعلي، وبالتالي من الممكن التخلص منه بأمانٍ. يتمثَّل العنصر الجديد الذي طرحه إيفرت في نفي مفهوم «الماضي»[1]. اقترح بيل بدلًا من العوالم المتفرعة التي تنمو مثل أغصان شجرة أن «التواريخ» المتنوعة للجسيم تجري بالتوازي، وقد تندمج أحيانًا مولِّدة تأثيرات التداخل. ومن ثم تتحدد النتائج عن طريق جمع هذه التواريخ، من دون ارتباطٍ يمكن تمييزه بين أي حاضر معين وأي ماض معين.

إلا أن نهج الإيفرتية الجديدة في الاستدلال يحصرنا فعليًا في جدلٍ لا ينتهي بخصوص مقايضة مجموعة من التصورات الميتافيزيقية المختلفة. إذا كنتَ تفضِّل بشكلٍ شخصيٍّ الوقوف إلى جانب بساطة الدالة الموجية الكونية الواقعية التي تصفها العملية ٢ بالكامل، إذن عليك أن تقرر ما إذا كنتَ جاهزًا كي تقبل تعدد العوالم باعتباره واقعًا فيزيائيًّا أم «أمرًا فعّالًا» ببساطة من أجل كل الأهداف العملية. يمكنكَ اجتناب ذلك عن طريق العودة إلى نظرية دي برولي – بوم، إلا أنكَ تحتاج حينئذٍ -كما رأينا- إلى إقناع نفسك بقبول تأثيرات شبحية لا محلية، عن بُعدٍ.

---

(١) J. S. Bell, 'Quantum Mechanics for Cosmologists', in C. Isham, R. Penrose, and D. Sciama (eds), Quantum Gravity 2 (Clarendon Press, Oxford, 1981). This paper is reproduced in J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987), pp. 117–38. This quote appears on p. 118.

أدخل زيه فكَّ الارتباط إلى الخليط، واعتبره وسيلة لشحذ العلاقة بين الأنظمة الكمية والكلاسيكية. تحدَّث بيل عن إحلال «التواريخ» العديدة للجسيم محل العوالم المتعددة. وعلى ذلك فالفارق بسيطٌ نسبيًّا بين هذا وبين تفسير تواريخ فك الارتباط الذي قدمتُه في الفصل السادس. شرح موري جيلمان هذا في كتابه الشهير «الكوارك والجاجوار» The Quark and The Jaguar المنشور في عام ١٩٩٤ على النحو التالي[١]:

«نعتقد في فائدة وأهمية عمل إيفرت، إلا أننا نعتقد كذلك أن ثمة الكثير مما ينقصه. وفي بعض الحالات أيضًا، خلق اختياره للمفردات وكذلك اختيار من جاءوا من بعده وعقَّبوا على عمله بعض التشوش. على سبيل المثال، يُصاغ تفسيره في الغالب من خلال «العوالم المتعددة»، بينما نعتقد أن المقصود حقًّا «تواريخ الكون البديلة المتعددة». علاوة على ذلك، توصف «العوالم المتعددة» على اعتبار أنها «واقعية بالقدر نفسه»، بينما نعتقد أن الأمر سوف يكون أقل تشوشًا لو تحدثنا عن «تواريخ متعددة» تعتبرها النظرية على القدر نفسه وتعاملها على هذا الأساس باستثناء احتمالياتها المختلفة».

إن الأمور جيدة على هذا النحو. إلا أن عليك ملاحظة أن تغيير المنظور لا يتعلَّق بإعادة تفسير الكلمات التي نستخدمها فقط. إن تفسير العوالم المتعددة تفسيرٌ واقعيٌّ في جوهره – يفترض وجود دالة موجية كونية واقعية وربما عوالم واقعية عديدة – بينما تواريخ فك الارتباط

(١) Murray Gell-Mann, The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex (Little, Brown, London, 1994), p. 138.

-كما رأينا في الفصل السادس- لا واقعية بشكلٍ كبيرٍ: خُفِّفت عبارة «واقعية بالقدر نفسه» إلى «تعتبرها النظرية على القدر نفسه وتعاملها على هذا الأساس». لقد بدأت تدرك أنه لا وجود لوسيلة سهلة للإفلات.

وها هنا تقع المعركة بأكملها. لا يلتزم العديد من الفيزيائيين النظريين والفلاسفة الذين يدافعون عن تفسير العوالم المتعددة أو الذي يدَّعون الانتماء إلى الإيفرتية أو الإيفرتية الجديدة بالضرورة بتفسيرٍ مفردٍ أو بمجموعة مفردة من التصورات الميتافيزيقية المسبقة[1]. كتب أدريان كينت في عام ٢٠١٠ أنه بعد مرور خمسين عامًا، لا توجد مجموعة عامة من الافتراضات والمسلَّمات محدَّدة بوضوحٍ، تشكِّل معًا «تفسير إيفرت لميكانيكا الكم»[2]. يعتقد كلُّ واحدٍ من المدافعين عن العوالم المتعددة في فهم لها، يخصُّه وربما ينفرد به. يهمني هذا من أجل ما سوف يلي، إذ إن نقدي قاصرٌ على أولئك المُنَظِّرين والفلاسفة الذين لم يحتضنوا الشخص الميتافيزيقي داخلهم فقط، بل قرَّروا الرهان بكل شيء على الميتافيزيقا.

دعا ديويت ويلر في مايو ١٩٧٧ إيفرت إلى المشاركة في مؤتمر، تنظمه جامعة تكساس في أوستن. كان موضوع المؤتمر الوعي البشري

---

(١) مثلما لا يوجد تفسيرٌ مفردٌ لكوبنهاجن.

(٢) Adrian Kent, 'One World versus Many: The Inadequacy of Everettian Accounts of Evolution, Probability, and Scientific Confirmation', in Simon Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent, and David Wallace (eds), Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality (Oxford University Press, Oxford, 2010), p. 310

والذكاء الصناعي المـولَّد بالحاسوب، وهو ما يعكس على الأرجح اهتمام ويلر المتزايد بدور الوعي في المساعدة على تعيين قوانين الفيزياء في «كونٍ تشاركي». حاضر إيفرت في حلقة نقاشية، لم تكن الحلقة النقاشية تدور حول العوالم المتعددة بل حول التعليم الذاتي للآلة.

وخلال راحة الغذاء في مطعمٍ بحديقة جعة، رتَّب ديويت جلوس إيفرت إلى جوار أحد طلاب الدراسات العليا لدى ويلر. وخلال الغذاء ناقش الطالب إيفرت في تفسيره، وكيف يفضِّل هو نفسه التفكير في الأمر، وعلى الرغم من ابتعاد إيفرت كثيرًا عن الحياة الأكاديمية في ذلك الوقت، وعلى الرغم من أنه لم يعد مستغرقًا في مثل هذه الأسئلة حول تفسير ميكانيكا الكم، فإن الطالب ناه إعجابًا وتأثُّرًا؛ كان إيفرت لا يزال متابعًا للنقاشات الجدلية.

كان اسم الطالب ديفيد دويتش.

سوف يمضي دويتش نحو تطوير نسخته الخاصة من تفسير العوالم المتعددة. ذهب إلى أن مفهوم الكون «المتفرع» مع كل انتقالٍ يتضمن تراكبًا كميًّا، يستحيل أن يكون صحيحًا. ثمة حقيقة بسيطة تقول إن التداخل ممكن حدوثه لجسيمٍ مفردٍ. تخبرنا هذه الحقيقة أن الواقع يتشكَّل من عددٍ لا نهائي من الأكوان المتوازية، وهو ما يُكَوِّن ما صار يُعرف الآن بشكلٍ عام باسم الكون المتعدد multiverse.

ومن أجل تتبُّع حجج دويتش دعنا نعود إلى وصف تداخل الشقَّين باستخدام الإلكترونات في الفصل الأول وخصوصًا شكل ٤ أ، إذ نرى فيه بقعًا متفرقة لامعة قليلة، تدل على أن إلكترونًا ارتطم هنا. شرحتُ في

الفصل الأول أنه يمكننا القول إنَّ تأثيرات التداخل باستخدام إلكترونات منفردة تُوَضِّح أن كلَّ إلكترون مفرد يتصرَّف مثل موجة -نتصوره مثل موجة واقعية أو «موجة معلومات» (بغض النظر عمَّا يعنيه هذا)- ويمرُّ عبر كلا الشقين في الوقت نفسه. والآن ماذا لو أبقت الإلكترونات بالفعل على خواصها كجسيماتٍ واقعية متمركزة (محددة الموضع)، قادرة على المرور من ثقبٍ واحدٍ فقط أو الآخر؟ ذهب دويتش إلى أن السبيل الوحيد إلى استعادة التداخل، يتمثَّل في طرح أن كل إلكترون تصاحبه إلكترونات «ظل» أو «شبحية» مُضيفة، تعبر من خلال كلا الثقبين وتتداخل مع مسار الإلكترون المرئي.

وفي الوقت الذي تؤثِّر فيه هذه الإلكترونات بوضوحٍ في مسار الإلكترون المرئي، لا يمكن رصدها هي نفسها - إذ لا توفر أي انطباع آخر ملموس عنها. وأحد تفسيرات هذا أن إلكترونات «الظل» لا توجد في عالمنا، تسكن بدلًا من ذلك عددًا ضخمًا من الأكوان المتوازية، جميعها مماثلة في تركيبها للكون الملموس، كما تطيع جميعها قوانين الفيزياء نفسها، إلا أنها تختلف من حيث إن للجسيمات مواضع مختلفة في الأكوان المختلفة»[1]. عندما نرصد تداخُل جسيم منفرد، لا نرى تداخل كمي لموجة - جسيم مع نفسها - نفسه، بل نرى تداخل جسيمات مضيفة في أكوان متوازية، مع جسيم في كوننا الملموس الخاص بنا.

إن الكون «الملموس» في هذا التفسير، هو ببساطة الكون الذي تختبره

---

(١) David Deutsch, The Fabric of Reality (Allen Lane, London, 1997), p. 45.

والذي تألفه. ليس مميزًا أو منفردًا: لا يوجد «كونٌ سيد». في الحقيقة ثمة العديد منك في أكوان عديدة، وكل منهم يعتبر كونه الكون الملموس. وبسبب الطبيعة الكمية للواقع التي تتأسَّس عليها هذه الأكوان المختلفة، لبعض الذين هم «أنت» خبرات مختلفة وتواريخ مختلفة وذكريات مختلفة حول الأحداث. يشرح دويتش الأمر: «ثمة العديد من ديفيد، يكتبون في هذه اللحظة هذه الكلمات بالضبط، وثمة آخرون يكتبونها على نحوٍ أفضل، وثمة آخرون ذهبوا من أجل تناول فنجان شاي»[١].

إن هذا مبالغٌ فيه للغاية كي نقبل به، خاصة عندما تأخذ في الاعتبار عدم امتلاكنا لأي دليلٍ تجريبي على الإطلاق، يشير إلى وجود هذه الأكوان المتوازية. إلا أن دويتش يذهب إلى أن تفسير الكون المتعدد هو السبيل الوحيد إلى تفسير الإمكانات الهائلة «للحوسبة الكمومية».

يستحق هذا التوقف عنده قليلًا وتغيير المسار.

يحتوي كلُّ حاسوب مكتبي أو حاسوب محمول أو جهاز لوحي أو تليفون ذكي أو ساعة ذكية أو عنصر من عناصر التكنولوجيا التي نرتديها على معالج للبيانات، تقوم المعالجات بعملياتها الحاسوبية على سلاسل من المعلومات الثنائية، تُدعى «بتّات»، تتكوَّن من مجموعات من الصفر والواحد. قيم البتات الكلاسيكية إما ٠ وإما ١، لها إحدى القيمتين أو الأخرى. لا يمكن الجمع بينهما معًا بطرقٍ عجيبة كي نحصل على تراكبات لـ ٠ و١. إلا أننا إذا خلقنا بتات من جسيمات كمية مثل الفوتونات أو الإلكترونات، يمكن الحصول على التراكبات العجيبة ل ٠

---

(١) Ibid., p. 53.

و1. على سبيل المثال، يمكننا أن نعزو القيمة «٠» لحالة اللف المغزلي ↑، والقيمة «١» لحالة اللف المغزلي ↓. يشار إلى هذه «البتات الكمية» باسم «كيوبتات» qubits. ولأنه من الممكن أن تتراكب الكيوبتات، تختلف معالجة المعلومات الكمية كثيرًا عن معالجة المعلومات الكلاسيكية. يمكن لنظام من بتات كلاسيكية أن يشكِّل «سلسلة بتات» واحدة فقط في الوقت الواحد، على غرار ٠١١٠٠١١٠١. إلا أننا نستطيع تكوين تراكبات من كل التشكيلات المتاحة في نظام يتكوَّن من كيوبتات. تتحدد الحالة الفيزيائية للتراكب عن طريق سعات الدوال الموجية لكل تشكيلٍ من الكيوبتات، مع وضع قيد عليها أن مربعات هذه السعات تُجمع إلى ١ (يعطي القياس سلسلة بتات واحدة وواحدة فقط).

ونصل هنا إلى الإثارة الكبيرة، إذا طبَّقنا عملية حاسوبية على بتة كلاسيكية، قد تتغيَّر قيمة هذه البتة من احتمالية إلى احتمالية أخرى. على سبيل المثال قد تتغير سلسلة من ثماني بتات من ٠١١٠٠١١٠١ إلى ٠١١٠٠١٠٠١. إلا أنه إذا طبَّقنا عملية حاسوبية على تراكب كيوبت، تتغيَّر كل مكونات التراكب في الوقت ذاته. يسفر مُدخَل في حالة تراكب كمي عن مُخرَج في حالة تراكب كمي. يقوِّم عددٌ قليلٌ من الترانزيستورات التي تكون إما في وضع التشغيل وإما في وضع إيقاف التشغيل بالعملية الحاسوبية على مُدخَل في الحاسوب الكلاسيكي. يعطينا مُدخَل خطي مُخرَج خطي، وإذا أردنا القيام بعمليات حاسوبية أكثر خلال وقتٍ معينٍ، علينا رصُّ عدد أكبر من الترانزيستورات في المُعالِج. كنَّا محظوظين كي نشهد نموًّا مهولًا في قدرات الحاسوب خلال ثلاثين عامًا الأخيرة[1].

---

(١) بحسب قانون مور (سُمِّي تيمنًا بجوردون مور، أحد مؤسسي شركة إنتل)، يتضاعف عدد الترانزيستورات في مُعالِج الكمبيوتر كل فترة زمنية تتراوح بين ١٨ شهرًا إلى عامين.

في عام ١٩٧١ طُرِح إنتل ٤٠٠٤، احتوى على مُعالِج مساحة سطحه ١٢ ميللي متر مربع ومثبتٌ فيه ٢٣٠٠ ترانزيستور. يحتوي أبل ١٢ بيونيك المستخدم في آي فون إكس إس وإكس إس ماكس وإكس آر التي أُطلِقت في سبتمبر ٢٠١٨ على سبعة بلايين ترانزيستور مكدَّسة في مُعالِج مساحة سطحه ٨٣ ميللي متر مربع، يتراوح العدد المسجَّل حاليًّا بين ٢٠ إلى ٣٠ بليون ترانزيستور، على حسب نوع الشريحة.

إلا أن هذا لا يُقارن بالكمبيوتر الكمي، إذ يعد بقدر أسي من العمليات الحسابية في الوقت نفسه.

تعتمد أنظمة التشفير المستخدمة في أغلب الاتصالات القائمة على استخدام شبكة الإنترنت وفي المعاملات المصرفية على حقيقة بسيطة، تكمن في أن إيجاد العوامل الأولية لأعدادٍ مكتملة كبيرة جدًّا يحتاج إلى قدرٍ مهولٍ من القدرات الحاسوبية[١]. على سبيل المثال، قُدِّر أن شبكة من مليون حاسوب تقليدي تحتاج إلى أكثر من مليون عام لإيجاد العوامل الأولية لعددٍ مكون من ٢٥٠ خانة، إلا أنه من الممكن إنجاز هذا العمل الضخم من حيث المبدأ في دقائق معدودات باستخدام حاسوب كمي مفرد[٢].

---

(١) تتضمن عملية تحليل العدد إلى عوامله، البحث عن أعدادٍ مكتملة هي عوامل عدد أكبر. على سبيل المثال، العدد ٤٢ يمكن تحليله إلى عوامله ٦ × ٧. تتضمَّن عملية تحليل العدد إلى عوامله الأولية البحث عن عوامل هي أعداد أولية، والأعداد الأولية هي أعداد لا يمكن تحليلها أكثر من ذلك، على ذلك فالعوامل الأولية للعدد ٤٢ هي ٢ و٣ و٧.

(٢) نحتاج إلى القليل من الانتباه هنا. تزيد سرعة الحواسيب الكمومية أسيا عند معالجة بعض المسائل المعينة فقط، مثل إيجاد عوامل عدد. إلا أنها قد لا تتقدم بأي مزايا على الإطلاق عند معالجة مسائل أخرى مثل التصنيف. انظر مقابلة بيتر شور مع جون هورجان https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/quantum-computing-for-english-majors/

يدَّعي دويتش أن هذا النوع من تعزيز القدرات الحاسوبية ممكنٌ فقط بسبب تأثيرات وجود الكون المتعدد. يحتاج الحاسوب الكمومي من أجل إيجاد عوامل عدد إلى $١٠^{٥٠٠}$ ضعف الموارد الحسابية التي نرى أنها موجودة فيزيائيًّا -أو نحو ذلك، أين تتم عملية إيجاد العوامل إذن[١]؟ نعرف بوجود $١٠^{٨٠}$ ذرة فقط في الكون المرئي، لذا يذهب دويتش إلى أننا نحتاج إلى استدعاء الموارد المتاحة في العديد من الأكوان المتوازية الأخرى من أجل إكمال عملية حسابية كمومية.

ولسنا بحاجة إلى أن نقول إنه لا يوجد إلى الآن كمبيوتر كمي يمتلك مثل هذه القدرات. إذ إن الأنظمة المُعدَّة في حالة تراكب كمي حساسة للغاية لفك الارتباط الناجم عن البيئة المحيطة، وهو الأمر الذي ذكرتُه من قبل، نحتاج في حاسوب كمومي إلى التعامل مع التراكب من دون تدميره. لا يُسمَح بفك الارتباط إلا عند الانتهاء من العملية الحاسوبية فقط. لم ننجح إلى الآن إلا في استعراض عمليات حاسوبية كمومية ناجحة باستخدام عددٍ صغيرٍ نسبيًّا من الكيوبتات[٢]. ربما لا يزال أمامنا فترة تتراوح بين ٢٠ إلى ٣٠ عامًا قبل أن يهدد هذا النوع من الحواسيب الكمومية أنظمة التشفير المستخدمة حاليًّا.

---

(١) Ibid., p. 216.

(٢) يقوم نظام دي ويف ٢٠٠٠ كيو على مُعالِج كمومي، يتكون من ٢٠٠٠ كيوبت فائقة التوصيل، قيل إنه تكلف ١٥ مليونَ دولار. مع ذلك علينا الانتباه إلى أنه في الوقت الذي نعرف فيه بشكلٍ عام أن ماكينات دي ويف تقوم على الحوسبة الكمومية، إلا أن العديد من الكيوبتات تعمل فعليًّا على تصحيح الأخطاء، لا إجراء الحسابات.

وعلى الرغم من هذه الاعتبارات العملية، فإننا نحتاج إلى النص على الزعم الرئيسي لدويتش - إذ يذهب إلى أن وجود الكون المتعدد هو التفسير الوحيد لتعزيز سرعة معالجة البيانات في الحاسوب الكمومي.

ولا يجب أن نتفاجأ عندما نعرف أن كون دويتش المتعدد قد حمل معه العديد من معضلات العوالم المتعددة. أولًا: الكيفية التي تتعامل بها العوالم المتعددة مع الاحتمالية الكمية، ولسنواتٍ عديدة تأرجحت الآراء حول ما إذا كان من الممكن اشتقاق قاعدة بورن باستخدام هذا التفسير. ادَّعى إيفرت أنه حلَّ هذه المعضلة بالفعل في أُطروحته، إلا أن هذا الحل لم يرضِ الجميع. يبدو أنه لا شيء قد يمنع راصدًا في كونٍ واحدٍ معين من رصد سلسلة من نتائج القياس التي لا تتفق مع توقعات قاعدة بورن.

قدَّم ماكس تيجمارك مثالًا حيويًّا على ذلك، ويعد تيجمارك أحد المتحمسين للعوالم المتعددة (وهو تلميذٌ سابقٌ آخر لويلر كذلك). طرح تيجمارك تجربة لاختبار تفسير العوالم المتعددة وهي تجربة ليست لضعاف القلوب، على التجريبيين سريعي التأثُّر أن يبعدوا أنظارهم الآن حقًّا.

تخيَّل أننا قمنا بتوصيل جهاز القياس الخاص بنا ببندقية آلية بدلًا من العداد. رُتِّبت الأمور بحيث تُذَخَّر البندقية الآلية برصاصة وتطلق البندقية الرصاصة عند رصد جسيم A في حالة ↓. إذا رُصِد A في حالة ↑ لا تُذَخَّر البندقية بأي رصاصة، وبدلًا من أن تطلق البندقية رصاصة تصدر عنها «تكة» مسموعة. نجلس في استرخاء، ونُشَغِّل جهاز الإعداد الخاص بنا. يُوَلِّد الجهاز تيارًا ثابتًا من جسيمات A في تراكب لحالتيْ ↑ و↓. نطمئن

إلى أن الجهاز يطلق الرصاصات وتصدر عنه تكات مسموعة بالمعدل نفسه وفي ترتيب عشوائي.

نصل إلى الجزء المُرَوِّع قليلًا.

تقف ورأسك أمام البندقية الآلية. (أخشى أنني لستُ مقتنعًا جدًّا بالحجج المؤيدة لتفسير العوالم المتعددة كي أكون مستعدًّا للمجازفة بحياتي بهذه الطريقة، بينما يجب أن يقوم أحدٌ بالتجربة) تفترض بالطبع -باعتبارك مدافعًا عن العوالم المتعددة- أنكَ لن تسمع إلا سلسلة طويلة من «التكات» المسموعة. تعرف بالطبع أنه توجد عوالم تناثرت فيها أدمغتك على حوائط المعمل، إلا أنكَ لستَ قلقًا من هذا على وجه الخصوص لأنه توجد عوالم أخرى أبقت على حيواتك.

من حيث التعريف، إذا لم تكن ميتًا، إذن فإن تاريخك هو واحدٌ سمعت فيه سلسلة طويلة من «التكات» المسموعة فقط. يمكنك التأكد من أن الجهاز لا يزال يعمل بشكلٍ جيدٍ عن طريق تحريك رأسك إلى أحد الجانبين حتى نقطة تبدأ عندها في سماع صوت إطلاق النيران مرة أخرى. على الجانب الآخر، إذا كان تفسير العوالم المتعددة خاطئًا، وكانت الدالة الموجية تمثِّل ببساطة معلومات مشفَّرة أو كان الانهيار ظاهرة واقعية فيزيائيًّا، فربما تكون سعيد الحظ خلال القياسات القليلة الأولى، إلا أنك لن تلبث أن تُقتَل عاجلًا بالتأكيد. يبدو وجودكَ المستمر دليلًا مقنعًا يدعم صحة تفسير العوالم المتعددة (سوف تبدو محصنًا بصورة إعجازية من جهاز كان يجب أن يقتلك بالفعل).

بغض النظر عن مخاطرتك الواضحة بحياتك، تظهر مشكلة هذه التجربة بمجرد محاولة نشر ورقة بحثية تصف اكتشافاتك في مجتمعٍ فيزيائي متشكك. قد توجد عوالم، لم تُسجَّل فيها إلا سلسلة طويلة من التكات المسموعة، مع ذلك، توجد عوالم عديدة أخرى، تحيط بي فيها فوضى حزينة جدًّا، ومطالبات بتفسيرات كثيرة. لا تختفي احتمالية دخول أحد هذه العوالم عند إعادة التجربة، وسوف تجد نفسكَ تمر بأوقاتٍ صعبة كي تقنع أقرانك أنكَ لستَ مجنونًا تمامًا. كتب تيجمارك[1]:

«ربما تتمثَّل أعظم هزليات ميكانيكا الكم في... أنكَ إذا شعرتَ ذات مرة باستعدادكَ للموت، وحاولتَ مرارًا الانتحار الكمي: فسوف تقنع نفسكَ تجريبيًّا بصحة (تفسير العوالم المتعددة)، إلا أنك لن تستطيع أبدًا إقناع أي شخصٍ آخر».

أودُّ الإشارة إلى أمرٍ آخر، يقتضي تاريخ لم تسمع فيه إلا سلسلة طويلة من التكات المسموعة عالمًا يُوَلِّد فيه التراكب الكمي نتيجة A↑ فقط. يشبه هذا إلى حدٍّ كبيرٍ رمي العملة والحصول دائمًا على «ملك»، أو رمي النرد والحصول دائمًا على ستة. إلا أن قاعدة بورن تلح على أن احتمالية رصد A↑ وA↓ يجب أن تكون ٥٠ : ٥٠. كيف يمكن استعادة قاعدة بورن من هذا؟

خصَّص الفيلسوف ديفيد والاس ثلاثة فصول طويلة للاحتمال

(١) Max Tegmark, 'The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?', Fortschritte der Physik, 46 (1998), 855–62. See also arXiv:quant-ph/9709032v1, 15 September 1997. This quote appears on p. 5.

والاستدلال الاحصائي في كتابه «الكون المتعدد الناشئ: نظرية الكم بحسب تفسير إيفرت» The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation، والمنشور في عام ٢٠١٢. وربما يكون هذا هو أكثر ملخصات تفسير إيفرت المتاحة شمولًا، إلا أنه على القرَّاء ملاحظة أن الشرح فيه ليس للعامة، وأنه على الأرجح سوف يكون متعذرًا على طلاب الدراسات العليا من دون تدريبٍ على الفيزياء والفلسفة كليهما. سعى والاس إلى اجتناب لفظة «العوالم المتعددة» (يمكن للقارئ أن يسمع ويلر وهو يهمس: «نحتاج إلى كلماتٍ أفضل!»). إلا أن والاس -مثله مثل إيفرت- لجأ إلى نظرية قرار بايزي ذاتية، ذاهبًا إلى أنَّ مكونات الدالة الموجية تُترجم إلى «أوزان» مختلفة للتفرعات المختلفة. ومن ثم يعزو الراصد بصورة ذاتية «احتمالات لنتائج الأحداث المستقبلية، تتفق مع قاعدة بورن»[1].

إلا أنكَ لا تختبر إلا سلسلة طويلة من التكات فقط في تجربة تيجمارك للانتحار الكمي، وسوف يقودك هذا لا محالة إلى استنتاج أنك لن تحصل في الأحداث المستقبلية إلا على نتيجة A↑. يتطلَّب الالتفاف حول هذا التحدي أكروباتًا ذهنيًّا مثيرًا. إذا كان هذا الأمر يتعلق بتوقع خبرات ذاتية مختلفة، إذن قد نميل إلى قبول أن الموت ليس خبرة. ثبت إذن خطأ التجربة بسبب الطريقة التي أُعدَّت بها. كتب والاس: «إن التجارب التي توفر أسسًا مبنية على الدليل لميكانيكا الكم لا تتضمن

(١) David Wallace, The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation (Oxford University Press, Oxford, 2012), p. 158.

في العموم موت القائم بالتجربة، ولا الأطراف الثالثة بالتأكيد مثل الكاتب!»[1].

أعترف أنني لستُ مقتنعًا تمامًا، ولستُ وحدي في ذلك، إذ إن ليف فايدمان -وهو أحد المتحمسين كذلك للعوالم المتعددة- غير مقتنع أيضًا[2].

عُد لفترة وجيزة إلى الطرح في الفصل الخامس. افرض أننا أعددنا فرقة من الجسيمات A في تراكب لحالتيْ اللف المغزلي ↑ و↓، إلا أننا قسنا النتائج على أساس + و−، كيف من المفترض للتفرعات أن «تعرف» أي أساس يوافق النتائج التي سوف تُرصَد وذلك في وجود عددٍ ضخمٍ من الطرق للتعبير عن التراكب من خلال حالات أساس مختلفة، يمكننا الاختيار من بينها في حرية؟ هذه هي معضلة «الأساس المفضل».

وكما رأينا، يمكننا أن نقول إن تحديد نتائج القياس المختلفة عن طريق فك الارتباط يساعد على التخلص من حدود التداخل (أو التقليل منها على الأقل)، إلا أنه لا يزال من اللازم افتراض أن الدالة الموجية موجَّهة بطريقة ما صوب الأساس المفضَّل في العملية. تتفاعل الدالة الموجية في نسخة والاس من تفسير إيفرت مع جهاز القياس الكلاسيكي والبيئة، منطورة بصورة طبيعية إلى تراكب لنتائج القياس. تُثبَّط حدود التداخل، وتُدرَك

---

(١) Ibid., p. 371

(٢) Lev Vaidman, 'Review: David Wallace, The Emergent Multiverse', British Journal for the Philosophy of Science, 66 (2014), 465–8. See also Lev Vaidman, 'Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics', Stanford Encyclopedia of Philosophy, substantive revision 17 January 2014.

النتائج النهائية في التفرعات المختلفة. كتب والاس: «إن فك الارتباط عملية ديناميكية، عن طريقه يصل مكونا كيانٍ مركب (الحالة الكمية) إلى التطور بمعزل أحدهما عن الآخر، وهو يحدث بسبب تبعات طارئة وعالية المستوى لديناميات كوننا الخاصة وحالته الابتدائية»[١].

على ذلك يربط فك الارتباط بشكلٍ طبيعي وسلس الدالة الموجية الابتدائية بالأساس المفضَّل الذي يتحدَّد وفق الطريقة التي أُعدَّت بها التجربة.

قد يبدو هذا معقولًا تمامًا، لكن دعنا نعود الآن -في النهاية- إلى الحوسبة الكمومية. اتضح وجود أكثر من طريقة واحدة لمعالجة الكيوبتات في حاسوب كمومي. ثمة طريقة لا تعالج الكيوبتات في تتابع. يقوم الحاسوب الكمومي «أحادي الاتجاه» على «حالة عنقودية» متشابكة للغاية، وهو يعمل عن طريق التغذية الأمامية بنتائج قياسات غير قابلة للانعكاس تُجرى على كيوبت مفرد. تحدد النتيجة (العشوائية) من خطوة واحدة الأساس الذي سوف يطبق في الخطوة التالية، يمكن ضبط طبيعة القياسات والترتيب الذي تُنَفَّذ به بحيث تحسب خوارزمية معينة[٢]. في عام ٢٠٠١ طرح روبرت راوسيندورف وهانس بريجل

---

(١) David Wallace, 'Decoherence and Ontology (or: How I Learned to Stop Worrying and Love FAPP)', in Simon Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent, and David Wallace (eds), Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality (Oxford University Press, Oxford, 2010), p. 62.

(٢) على سبيل المثال، يمكن استخدام ضبطٍ معين لأربع كيوبتات مرتَّبة في دائرة لحساب خوارزمية بحث في قاعدة بيانات، ابتكرها لوف جروفر في عام ١٩٩٦.

حاسوبًا من هذا النوع[1]، وقد أُعلِن في عام ٢٠٠٥ عن عرض عملي لعمليات حوسبية باستخدام حالة عنقودية من أربع كيوبتات[2].

على ذلك، يتغيَّر أساس كل قياس في حاسوب الحالة العنقودية بشكلٍ عشوائي من إحدى خطوات الحساب إلى الخطوة الأخرى، ويختلف من كيوبت إلى الآخر. لاحظ أن «القياس» هنا غير قابل للانعكاس، ومع ذلك لا يتضمن عملية تضخيم، قد نستحضر فك الارتباط من خلالها. على العكس تمامًا. يجب أن تظل التراكبات الكمية اللازمة للحوسبة الكمومية مترابطة – يتحدد الطول الأقصى لعملية حوسبية عن طريق طول المدة الزمنية التي يمكن الإبقاء على الترابط خلالها. يعتبر فك الارتباط في نظام مثل هذا «ضوضاء» غير مرغوبٍ فيها.

حتى لو ظهر أساسٌ مفضَّل بطريقة ما خلال إحدى خطوات الحوسبة، فلن يكون بالضرورة الأساس المطلوب للخطوة التالية في التسلسل. لا يمكن لفك الارتباط أن يساعدنا هنا. كتب الفيلسوف مايكل كوفارو: «هكذا يستحيل اعتبار أن حاسوب الحالة العنقودية يجري قياساته في عوالم متعددة، إذ إنه لا توجد وسيلة في حالة حاسوب الحالة العنقودية لتعيين هذه العوالم من أجل وصف الحوسبة في المجمل»[3].

---

(١) R. Raussendorf and H. J. Briegel, 'A One-Way Quantum Computer', Physics Review Letters, 86 (2001), 5188-91.

(٢) P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer, and A. Zeilinger, 'Experimental OneWay Quantum Computing', Nature, 434 (2005), 169-76. See also arXiv:quant-ph/0503126, 14 March 2005.

(٣) Michael Cuffaro, 'Many Worlds, the Cluster State Quantum Computer, and the Problem of the Preferred Basis', Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 43 (2012), 35–42. See also arXiv:physics.hist-ph/1110.2514v2, 10 January 2012. This quote appears on p. 17.

وعلى ذلك، ثمة شكٌّ في أن تطرح العوالم المتعددة أو الكون المتعدد أي نسقٍ مفيدٍ للتفكير في الحوسبة الكمومية، في هذه الحالة. يعتقد كوفارو أن أولئك المؤيدين ممن لا يأخذون الواقعية الفيزيائية للعوالم المختلفة أو للتفرعات بجدية كبيرة للغاية، ينبغي لهم أن يتفقوا مع حجَّته بوجه عام[1]. بمعنى آخر، إذا مثلت العوالم المختلفة المتعددة ببساطة وسيلة للتفكير في المشكلة، من دون اعتبارها واقعية فيزيائيًّا، فذلك ليس بالأمر الكبير.

يعترف والاس أن ما يُطلَق عليه «التوازي المفرط» (أي الكون المتعدد) كان مفيدًا تاريخيًّا كوسيلة للتفكير في الحوسبة الكمومية، إلا «أنه لم يظل وسيلة مثمرة بشكلٍ خاصٍّ فيما بعد». يواصل قائلًا: «لا يقود تفسير إيفرت على وجه الخصوص إلى التفكير بشكلٍ آخر يختلف عن التالي: تحدث المجريات الكلاسيكية المتوازية المفرطة من أجل فهم حالة كمية بصورة عارضة فقط في الظروف المناسبة، وما من سببٍ يدعو إلى أن تكون حاضرة بالنسبة إلى الأنظمة الميكروسكوبية في الأصل (أي المترابطة)»[2]. إلا أنه في الظروف التي يكون فيها فك الارتباط ممكنًا فإن العوالم الناشئة العديدة واقعية بالنسبة إلى والاس، «مثلما هما الأرض والمريخ واقعيان»[3].

إن والاس فيلسوفٌ، وتأمُّلاته حول واقعية الكون المتعدد قاصرة بدرجة كبيرة على مجلات وكتب الفلسفة، إلا أن دويتش عالِمٌ. مع

---

(١) Michael Cuffaro, personal communication, 19 June 2019.

(٢) David Wallace, personal communication, 25 June 2019.

(٣) David Wallace, personal communication, 27 June 2019

ذلك، يصرُّ أيضًا على قبول وجود واقعي لهذه العوالم: «رأيي أن الحجج والبراهين التي تدل على الأكوان الأخرى توازي إلى حدٍّ كبيرٍ الأدلة التي تشير إلى وجود الديناصورات، أقصد أن تلك الأكوان واقعية - تَخطَّى ذلك»[1].

أظن أننا قد تجاوزنا الحدود الآن. ذهبتُ إلى أنه يستحيل ممارسة علمٍ من أي نوعٍ من دون الميتافيزيقا. إلا أنه عندما تصبح الميتافيزيقا غامرة ويضيع أي أمل في الاتصال بالواقع التجريبي ولا يتبقَّى شيء سوى الميتافيزيقا - لا تعود مثل هذه التخمينات علمية بأي حالٍ. والآن نتأرجح إلى حافة خاريبدس، تسقط سفينة العلم في قبضتها القوية، ننظر في اضطراب، إذ إن السفينة بدأت في الانزلاق نحو الهاوية.

وَجَدتْ في السنوات الأخيرة تنويعاتٌ أخرى على نظرية الكون المتعدد طريقَها إلى الوعي الجمعي، جاءت من النظرية الكونية «للتضخم الأبدي»[2] eternal inflation ومما يطلق عليه «المنظور الكوني» لنظرية الأوتار الفائقة. إلا أن هذه التنويعات مختلفة جدًّا: تصوروها من أجل أسبابٍ مختلفة وفي إطار «تفسير» أوجه أخرى للفيزياء التأسيسية وعلم الكونيات. مع ذلك تستحضر هذه التنويعات سلسلة الحجج نفسها بدرجة كبيرة. أعلن مارتن ريس الفلكي الملكي البريطاني أن

---

(١) David Deutsch, interview with John Horgan, 'The Infinite Optimism of Physicist David Deutsch', 17 January 2018, https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/the-infinite-optimism-of-physicistdavid-deutsch/

(٢) تذهب نظرية التضخم الأبدي إلى أن الكون في أغلب أجزائه يتضخم بشكلٍ سريعٍ ومهولٍ، وهو ما يؤدي إلى نشأة أكوان عديدة افتراضية لا نهائية. (المترجم).

الكون المتعدد الكوزمولوجي ليس ميتافيزيقًا بل علمًا مثيرًا، «قد يكون صحيحًا»، ويراهن بحياة كلبه عليه(١).

سعى بعض المُنَظِّرين إلى دمج نظريات الكون المتعدد المختلفة في بنية واحدة، مع اختلاف أصولها وأغراضها التفسيرية. نَظَّم تيجمارك هذه المقاربات المختلفة في تسلسلٍ متداخل من أربعة مستويات، وذلك في كتابه الحديث «كوننا الرياضي» Our Mathematical Universe(٢). يضم المستوى I للكون المتعدد الأكوان التي لها مجموعات مختلفة من ظروف وتواريخ الانفجار العظيم الابتدائية إلا أن لها قوانين الفيزياء الأساسية نفسها. وهذا هو الكون المتعدد للتضخم الأبدي. المستوى II هو كونٌ متعددٌ للأكوان فيه قوانين الفيزياء الأساسية نفسها إلا أن لها قوانين عاملة مختلفة (على سبيل المثال، ثوابت فيزيائية مختلفة). تصادف أن نحيا في كونٍ سمحتْ قوانينه وثوابته بوجود حياة ذكية (هذه هي معضلة «الضبط الدقيق»). المستوى III هو الكون المتعدد الخاص بتفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم. المستوى الرابع هو الكون المتعدد لكل البنى الرياضية الممكنة التي تقابل قوانين فيزيائية أساسية مختلفة.

---

(١) Martin Rees, 'What are the Limits of Human Understanding?', Prospect Magazine, 13 November 2018. https://www.prospectmagazine.co.uk/magazine/martin-rees-what-are-the-limits-of-humanunderstanding

(٢) Max Tegmark, Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality (Penguin Books, London, 2015); see particularly Chapter 8.

أتركك كي تقرِّر ما الذي تفعله بهذا.

جذب تفسير العوالم المتعددة والتنويعات المختلفة لنظرية الكون المتعدد بعضَ المؤيدين المرموقين مثل شون كارول ونيل دي جراس تايسون وديفيد دويتش وبريان جرين وآلان جوث ولورنس كراوس وأندريه ليند ومارتن ريس وليونارد سسكيند وماكس تيجمارك وليف فايدمان وديفيد والاس. ومرة أخرى عليكَ الانتباه أن هذه القائمة تحتوي على «الإيفرتيين الجدد» الذين لا يفسِّرون الكون المتعدد واقعيًّا بالضرورة، لكنهم يفضلون التفكير فيه على أنه أداة مفاهيمية مفيدة. ومن المثير أن هؤلاء يميلون إلى أن يكونوا فلاسفة: أما العلماء فيسعون كي يكونوا أكثر موضوعية. تضم قائمة من يرفعون أصواتهم ضد هذه المقاربة لأسباب عديدة مختلفة بول ديفيز وجورج إليس وديفيد جروس وسابين هوسينفيلدر وروجر بنروز وكارلو روفيللي وجو سيلك وبول شتاينهاردت ونيل تورك وبيتر وويت. أميل إلى موافقتهم الرأي[1].

للعلماء الأكاديميين مطلق الحرية بالطبع في اختيار ما يرغبون في الاعتقاد فيه، ويمكنهم نشر وقول ما يحبون ضمن حدود العقلانية. إلا أنهم في تصريحاتهم ومنشوراتهم يصرفون النظر عن الطبيعة التخمينية والخلافية لنظريات الكون المتعدد أو يتجاهلونها ببساطة. إن الكون المتعدد لطيفٌ. ضع الكون المتعدد في عنوان أو على رأس مقال وستزيد

(١) انظر على سبيل المثال: Jim Baggott, Farewell to Reality: How Fairy-tale Physics Betrays the Search for Scientific Truth (Constable, London, 2013), especially Chapter 9; and Sabine Hossenfelder, Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray (Basic Books, New York, 2018).

احتمالية جذب الانتباه والوصول إلى الإعلام الشعبي واستدعاء النقرة المهمة للغاية التي تتفاعل مع الإعلانات.

يمكن إعادة التأطير للعوالم المتعددة كي تصير رفضًا أنيقًا إلى حدٍّ ما لتفسير كوبنهاجن، ويصاحب ذلك رسم صورة المؤيدين لها (خاصة إيفرت وديويت) في هيئة رومانسية وفي سمت الأبطال «الخارجين على الرجل»، والرجل هو بور وهايزنبرج ومعتقدهم الشرير(١). هذه هي الصورة التي رسمها آدم بيكر في كتابه الحديث الموجَّه إلى العامة «ما الواقعي؟» What is Real? يذهب بيكر إلى أن النظريات «تحتاج إلى توفير تفسيراتٍ وتوحيد المفاهيم السابقة التي تقطَّعت بها السبل، وإقامة علاقة من نوعٍ ما مع العالم من حولنا»(٢). إلا أنه عندما تُفقَد كل صلة بالواقع التجريبي ولا يتبقى لنا سوى الميتافيزيقا، من الذي يقرِّر مكونات «علاقة من نوعٍ ما»؟

يطلق لي سمولين في كتابه الحديث عن ميكانيكا الكم على هذه الميول اسم «الواقعية السحرية»(٣)، وأظن شخصيًّا أنها مساحة خطيرة للغاية. تصعب مقاومة النزوع إلى محاربة الدوجمائية بدوجمائية أشد منها. بالنظر إلى نظرية الكون المتعدد وإلى النظريات التخمينية الأخرى في الفيزياء التأسيسية، نجد

---

(١) انظر: See Christopher A. Fuchs, 'Copenhagen Interpretation Delenda Est?', arXiv:quant-ph/1809.05147v2, 11 November 2018

(٢) Adam Becker, What is Real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics (John Murray, London, 2018), p. 264.

(٣) Lee Smolin, Einstein's Unfinished Revolution: The Search for What Lies beyond the Quantum (Allen Lane, London, 2019), p. xxiii.

أنها تحيد بنا بعيدًا عن ما يعتبره الكثيرون مفاهيم المنهجية العلمية العتيقة، يريدون منَّا التوقُّف عن هوسنا بالدليل التجريبي، وأن نحتضن بدلًا منه «الحلول البسيطة» التي تأتي مع التفسيرات الميتافيزيقية البحتة.

يستحيل أن يكون هذا جيدًا، في زمنٍ تتزايد حملات أولئك الذين يتبنون خطة مناهضة للعلم على سلطان العلم، يخلص المؤرخ الدانماركي هيلج كراج إلى أنه[1]:

«يوجد من ذهب إلى أن التصميم الذكي لا يكاد يكون أقل في قابليته للاختبار من نظريات العالم المتعدد الكثيرة. ربما يحمل رفض التصميم الذكي على أساس عدم قابليته للاختبار والقبول مع ذلك بالكون المتعدد كفرضية علمية مثيرة مغبة تطبيق معايير مزدوجة. ومن منظور بعض الخلقويين وبعض اللا خلقويين، فقد حصلت قضيتهم على دعمٍ منهجيٍّ غير مقصود من فيزياء الكون المتعدد».

لا تسيء فهمي. أستوعب جيدًا مشاعر أولئك المُنَظِّرين والفلاسفة الذين يفضِّلون أن يتبنَّوا منظورًا واقعيًّا، وأدرك إحساسهم بأنه لا خيار أمامهم سوى قبول تفسير العوالم المتعددة. إلا أنه في غياب الدليل، لا تُتَرجَم التفضيلات الشخصية إلى أشياء فيزيائية موجودة بالفعل. من جانبي، أقبل في رضا بأنه قد كانت للعوالم المتعددة قيمة مهولة كوسيلة لفهم الحوسبة الكمومية، إلا أن الاعتقاد فيها لا يجعلها واقعية. وعلى الرغم من أن التفسيرات اللا واقعية البديلة قد تحظى بقبول فلسفي أقل

---

(1) Helge Kragh, Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology (Oxford University Press, Oxford, 2011), p. 285.

لدى البعض، فإنه يجب الاعتراف بأنها لا تجذب معها الكثير للغاية من الزخارف الميتافيزيقية. تبقى الصياغة نفسها محايدة بشكلٍ سلبي وملغزة، لا تهتم بما نعتقده حيال معناها.

ثمة نقطة واحدة أخيرة. لا تقدم لنا التفسيرات القائمة على العوالم المتعددة أو الكون المتعدد أيَّ مفاتيح فعلية تساعد بطريقة ما أو أخرى على الحصول على أي دليلٍ تجريبي بخصوصها، على خلاف تفسيرات واقعية أخرى، تعرضنا لها، حتى تلك التي أفرطت في استخدام التخمين بدرجة أكبر. وهذه هي نقطة انهيار نظريات الكون المتعدد بالفعل، على الأقل بالنسبة إليَّ. وبغض النظر عمّا قد «تفسره» هذه النظريات بخصوص طبيعة الواقع الكمي، علينا التسليم بأننا لا نحصل عمليًّا من هذه التفسيرات إلا على أقل القليل أو ربما لا نحصل على أي شيء على الإطلاق. لا توفر أي أساس للقيام بأي فعلٍ يتفق مع الفرضية #٤. لا تختلف تنبوءاتها التي قد تفصح عنها كثيرًا عن حيل العرافين غير المحددة، وهي عبارة بوبر الشهيرة. ومن غير المفاجئ أبدًا أن هذا ما حذَّرنا منه أينشتاين في عام ١٩٥٠، عندما أوضح أن «شغف الفهم» يقود إلى «توهم أن الإنسان قادرٌ على فهم العالم الموضوعي بشكلٍ عقلاني عن طريق التفكير المحض، من دون أي أسس تجريبية – أي طريق الميتافيزيقا باختصارٍ»[1].

---

(١) Albert Einstein, 'On the Generalized Theory of Gravitation', Scientific American, 182 (April 1950), p. 13. يواصل أينشتاين: «أعتقد أن كل مُنَظِّر أمين هو ميتافيزيقي مُرَوَّض، لا يهم كيف يتوهم نفسه "وضعيًّا" مخلصًا. يعتقد الميتافيزيقي أن البسيط منطقيًّا واقعيٌّ كذلك. يعتقد الميتافيزيقي المُرَوَّض أن البسيط منطقيًّا لا يتغلغل بالكامل بالضرورة في الواقع الذي نختبره، بل يمكن "فهم" الخبرات الحسية كلها في المجمل على أساس نظام مفاهيمي مبني على مقدمات بسيطة للغاية».

تعرَّضتُ في الفصل الثالث لطرح الفيلسوف جيمس لاديمان، إذ يذهب إلى أننا نتطلّع إلى مؤسسات العلم من أجل التمييز بين ما هو علمٌ وما ليس علمًا، وبالتالي فهذه المؤسسات تدافع عن سلامة العلم وذلك عن طريق استبعاد ادعاءات المعرفة الموضوعية القائمة على ميتافيزيقا خالصة. إلا أن هذه المؤسسات لم تمنع إلى الآن مجلاتها العلمية من نشر أوراقٍ بحثية فارغة من المحتوى التجريبي ومملوءة بالتنظير القائم على التخمين الذي لا يبشِّر إلا أقل القليل بالاتصال بالواقع التجريبي. وعلى الرغم من جهود عالم الكونيات جورج إليس والفيزيائي الفلكي جوزيف سيلك من أجل التحذير من الخطر في عام ٢٠١٤ ونداءاتهما التي وجَّهاها إلى بعض هذه المؤسسات من أجل «الدفاع عن سلامة الفيزياء»[١]، فإن الأمور لم تتغير إلا أقل القليل، يبدو أنه قد أُسقِط في يد لاديمان، إذ أخبرني أن «الخطأ الشائع حول الأساسيات بين الخبراء يمكن أن يقع، بل يقع فعلًا»[٢]. يعتقد أن التصحيح سوف يأتي على المدى الطويل، عندما تحدث طفرة علمية فعلية. وإلى أن يحدث ذلك، ليس أمامنا أي خيارٍ سوى النظر إلى سفينة العلم في هلعٍ بينما تختفي في الهاوية، لقد فقدنا كلَّ تحكم.

* * *

---

(١) George Ellis and Joe Silk, Nature, 516 (2014), 321–3. 43.

(٢) James Ladyman, personal communication, 29 March 2019

تتمة

لديَّ شعورٌ سيِّئ جدًّا حيالها

بغض النظر عمَّا ستفعله بكل هذا، أظن أنك توافق بالتأكيد على أن ميكانيكا الكم نظرية مذهلة حقًّا. تجبرنا على مواجهة أسئلة صعبة بخصوص نظرتنا نحو ما نقوم به عندما نطور تمثُّلًا علميًّا للواقع الفيزيائي، وما الذي نتوقَّع الحصول عليه من مثل هذا التمثُّل. كما تجبرنا على مواجهة بعض الحقائق الفلسفية البسيطة، كان من السهل للغاية تجاهلها في الميكانيكا الكلاسيكية.

آمل أن أكون قد شرحت طبيعة معضلتنا بشكلٍ كافٍ في هذا الكتاب. يمكن أن نتبنَّى تفسيرًا لا واقعيًّا، تختفي معه كل مشاكلنا المفاهيمية، إلا أنه يرغمنا على قبول أننا قد بلغنا أقصى حدود قدراتنا على الوصول إلى حقائق أعمق عن واقع الأشياء في نفسها. تخبرنا التفسيرات اللا واقعية أنه لا شيء هنا كي نراه. ولا توفر هذه التفسيرات بالضرورة أي لمحاتٍ بخصوص الموضع الذي علينا البحث فيه كي نفوز بتبصرات جديدة أو فهمٍ مختلفٍ، إنها شاهدٌ سلبيٌّ صامتٌ على غموض الطبيعة.

وفي المقابل، توفِّر لنا التفسيرات الواقعية البسيطة والمستساغة والقائمة على المتغيرات الخفية المحلية واللا محلية المُعمَّاة الكثير من

اللمحات، كما تواصل الحث على إجراء تجارب مذهلة الدقة. للأسف، نجد الآن أن الدليل الساحق يشير إلى أن الطبيعة تنكر علينا هذه الوسيلة السهلة للخروج من المأزق، يقبل جميع الفيزيائيين حاليًّا بهذا باستثناء أكثرهم عنادًا. إذا فضَّلنا تفسيرًا واقعيًّا ينظر إلى ظاهر الدالة الموجية وظاهر كل المشكلات المفاهيمية التي تقتضيها، إذن ليس أمامنا سوى ما أُطلِق عليه، الاختيار من بين شرورٍ غير مستساغة. يمكننا اختيار نظرية دي برولي – بوم والقبول بتأثير شبحي لا محليٍ عن بُعد. يمكننا اختيار إضافة آلية انهيار تلقائي لحاجة بنا والأمل في حظٍّ جيدٍ. يمكننا اختيار تضمين الوعي في الخليط، دامجين مشكلة شديدة الصعوبة بواحدة أخرى، أو يمكننا اختيار عوالم إيفرت العديدة والكون المتعدد.

يَخلُص سمولين في كتابه الحديث «ثورة أينشتاين غير التامة» Einstein›s Unfinished Revolution إلى أن ميكانيكا الكم غير مكتملة بالتأكيد، إلا أنه «لهذه الواقعية في أيٍ من نسخها ثمنٌ علينا دفعه من أجل الحصول على نظرية جديدة معقولة تمامًا، تصف الطبيعة على نحوٍ صحيحٍ وكاملٍ»[1]. أترك لك حرية اختيار التفسير الذي يروق لك من بين التفسيرات الواقعية التي نظرنا في أمرها في هذا الكتاب وتظن أنه يستحق دفع الثمن (أو تظن أنه أقلُّها شرًّا). يظل سمولين غير مقتنع بكل هذه التفسيرات بعد أن ضجر من مناقشة كل المقاربات الموجودة وما تأخذ به وما تستثنيه. يشعر أنه لا خيار أمامه سوى «أن يقصد رأسًا

---

(1) Lee Smolin, Einstein's Unfinished Revolution: The Search for What Lies beyond the Quantum (Allen Lane, London, 2019), p. 180.

إلى المستنقع» بحثًا عن أفكارٍ جديدة، ولسان حاله «سوف أفشل على الأرجح، إلا أنني آمل أن أبعث رسائل تحفيزٍ وإلهامٍ لتلك القلة التي تشعر في أعماقها بفداحة ثمن الجهل والتخلي عن البحث مبكرًا للغاية»[1].

فضَّلتُ لسنوات عديدة واقعية أينشتاين، وأيدتُّ رفض بيل لمذهب كوبنهاجن (وما زلتُ مؤيدًا). لقد تدربت لأكون تجريبيًّا، وأظن أنه من العسير بالفعل أن تجري تجارب من أي نوع -أو أن تدخل، بحسب اصطلاح هاكينج- من دون أن تعتقد بشدة في واقعية الأشياء التي تجري تجاربك عليها. لذلك أظن أنه من المهم للغاية استكشاف ما الذي يعنيه أن تكون «واقعيًّا» وذلك تأسيسًا على الفرضيات الأربع التي استعرضتُها في الفصلين الثاني والثالث. قد تجادل قلة من العلماء ضد الفرضية #١ (الواقعية الموضوعية) والفرضية #٢ (واقعية الكيانات). إلا أنني كلما فكرتُ في الفرضية #٣، تشككتُ فيها، على الرغم من قناعاتي الواقعية التي لا تتزعزع، وهي الفرضية التي تذهب إلى أن المفاهيم الأساسية لنظرية (مثل الدالة الموجية الكمية) تمثل بالضرورة حالات فيزيائية واقعية، فإنه نمت بداخلي بعض الشكوك على مرِّ السنين.

إنَّ لديَّ شعورًا سيئًا جدًّا حيالها، مثلي كمثل الفيلسوف العظيم هان سولو.

سوف أذكر لكَ سببين فقط، أسهما في إثارة شكوكي، يأتي الأول ببساطة من الطريقة التي نطبق بها ميكانيكا الكم في روتينية.

---

(١) Ibid., p. 277.

أوضحت أنه لا وجود لما يُسمّى الدالة الموجية «الصحيحة»، وإذا تبِعنا القواعد، نملك حرية التعبير عن الدالة الموجية وفق الأساس الأكثر ملاءمة لمسألتنا، مهما كان. في الحقيقة، عندما نرتاح في جلستنا وندقق النظر فيما نقوم به عند استخدام الصياغة الكمية، ندرك أننا لا نستفيد بالدالة الموجية على الإطلاق في الجانب الأكبر من العمل. نستخدم كياناتٍ رياضية مثل مؤثر الإسقاط وسمات الإسقاط وقيم التوقُّع، تُشتَق من الدوال الموجية وترتبط بصورة أكبر بالبنية المعرفية التي نطلق عليها ميكانيكا الكم. ولا نحتاج من أجل القيام بهذا إلى استكشاف الماهية الفعلية للدالة الموجية. نحتاج إلى أن نعرف فقط كيف تتعلّق حالة كمية بحالة كمية أخرى، ونحصل على ذلك من خبرتنا بالفيزياء.

تعتبر هذه الحرية والمرونة مناقضتين تمامًا لأي تفسيرٍ واقعي للدالة الموجية. وعلى الرغم من عدم انحيازي بالضرورة إلى تفسير روفيللي العلائقي، فإنه عليَّ الاعتراف أن تفسيره للدالة الموجية على أنها وسيلة «لتشفير» خبراتنا فقط، بدأ يتردَّد صداه بقوة.

أما السبب الثاني، فيتلخص في أن نتائج التجارب المصممة لاختبار لا متساويتي بيل وليجيت ينبغي لها أن تجعل أي واقعي يتوقف ويفكر. ازداد تحفظي كثيرًا على الثمن الفادح الذي علينا دفعه في مقابل أي تفسير واقعي، لم تستبعده التجربة بعد، وازداد تحفظي بصورة خاصة على التفسيرات الواقعية التي لا تناسب الاختبار التجريبي. نعم، أوافق على أن بعض التفسيرات نجحت في الحض على أبحاث تجريبية جديدة

انطلاقًا من روح الفرضية #٤، إلا أنني أعترف في يومٍ عصيبٍ بأن لدي بعضَ الشكوك العميقة حيال ما ستنتهي إليه هذه التجارب.

لستُ وحدي. خضع ٣٣ عالِمًا لاستطلاع رأي خلال مؤتمر حول أسس ميكانيكا الكم، عُقِد في تراونكيرشن، في النمسا، في عام ٢٠١١، وعلى الرغم من أنه لا ينبغي لنا أن نستشف الكثير للغاية من النتائج، فإن استطلاع الرأي عكس انحيازًا كبيرًا تجاه التفسيرات اللا واقعية (انظر شكل رقم ١٧)[١]. لا يعتبر عدد المشاركين ذا دلالة إحصائية بالتأكيد، ولا تعتبر العينة محايدة تمامًا كذلك – نظَّم المؤتمر أنطون تسايلنجر، وهو ما قد يفسر التفضيل الشديد لتفسيرات نظرية المعلومات وغياب الأصوات المؤيدة لنظرية دي برولي – بوم وللتواريخ المتسقة. كما كان من الملحوظ غياب الأنصار الرئيسيين لتفسير العوالم المتعددة الذين ذكرتهم في الفصل العاشر، ومع ذلك، جاءت النتائج مبهرة تمامًا.

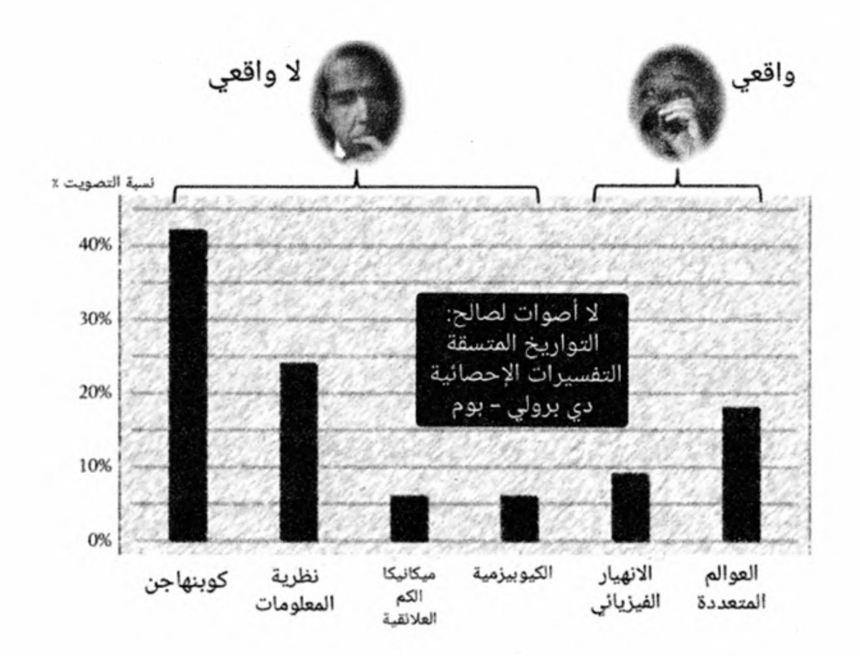
ربما يكون من الأفضل التصرُّف وفق منطق أوديسيوس، المجازفة بعددٍ قليلٍ من أفراد الطاقم عن طريق الإبحار على مقربة للغاية من سيلا، بدلًا من تضييع سفينة العلم بأكملها في خضم دوامة الهراء الميتافيزيقي

---

(١) Maximilian Schlosshauer, Johannes Koer, and Anton Zeilinger, 'A Snapshot of Foundational Attitudes toward Quantum Mechanics', arXiv:quant-ph/1301.1069v1, 6 January 2013. وقبل أن تسأل، لا، لم أحضر. إلا أنني سعدتُ للغاية بدعوتي إلى الحديث في مؤتمرٍ لاحقٍ حول الموضوع نفسه، عُقِد في تراونكيرشن في نوفمبر ٢٠١٣، عقب نشر كتابي «وداعًا للواقعية».

التي هي خاريبدس. إذا كنَّا سنتعلَّم شيئًا جديدًا، فيجب أن ترتبط تخميناتنا عن تمثلنا للواقع بالحقائق التجريبية للأشياء كما تبدو. في النهاية، هذا ما يجعل أمرًا ما علمًا. يستحيل أن أقبل تفسيرًا قائمًا على الميتافيزيقا الخالصة، بغض النظر عن بساطة مقدماته. ذهب دينيت إلى أن قبول الثنائية الكانطية استسلامٌ، وأظن أن قبول العوالم المتعددة استسلامٌ كذلك.

قد يكون ثمة سبيلٌ آخر للخروج من المأزق. إنني واثقٌ إلى حدٍّ كبيرٍ بأن ميكانيكا الكم ليست النهاية. على الرغم من نجاح ميكانيكا الكم الذي لا يُضاهى، فإننا نعرف أنها لا تدمج المكان والزمان بالطريقة الصحيحة. وهذا هو السبب وراء ظني أن التفتيش الدقيق في دالة موجية مفسرة واقعيًّا لا يمثِّل بالضرورة طريقًا جيدًا، يقود إلى الإجابة، إذ إنه مثقلٌ بالمكان والزمان المطلقين. ولسوء الحظ، لا يمكننا أن نأمل في أن تنتشلنا الجهود المعاصرة لتطوير نظرية كم للجاذبية، إذ إنها ترتكن بصورة كبيرة للغاية على الصياغة الكمية الموجودة حاليًّا، ولا تقدم أي وسيلة واضحة لتجاوزها.



شكل رقم ١٧: نتائج استطلاع رأي في صورة اختيار من متعدد، وُزِّع على ٣٥ شخصًا من حضور مؤتمر «فيزياء الكم وطبيعة الواقع»، نَظَّمه أنطون تسايلنجر وعُقِد في الأكاديمية الدولية، في تراونكيرشن، في النمسا، في يوليو ٢٠١١. يوضح هذا الشكل البياني النتائج التي حصلنا عليها من ٣٣ شخصًا، أجابوا عن سؤال: «ما هو تفسيرك المفضل لميكانيكا الكم؟» تجاوزت عمن اختاروا «أخرى» (١٢٪) و«ليس لديَّ تفسيرٌ مفضلٌ» (١٢٪). لم تكن هناك أصواتٌ لصالح تفسيرات لم أتعرَّض لها في هذا الكتاب مثل، تفسير المعاملات لجون كريمر[١].

(١) يذهب هذا التفسير إلى أن المصدر يرسل موجة متأخرة تسافر في الزمن إلى الأمام، كما يرسل موجة متقدمة تسافر في الزمن إلى الخلف. يصدر كذلك المستقبل موجة متأخرة تسافر في الزمن إلى الأمام وموجة متقدمة تسافر في الزمن إلى الخلف. يحدث التفاعل الكمي عندما تلتقي موجة متقدمة واحدة متأخرة ويحدث تبادل فيما بينهما. هذه نظرية لا محلية لذا تتفق مع أحدث النتائج التجريبية للنظرية كما أنها سببية تمامًا كذلك. (المترجم).

وربما تظل أي نظرية تتجاوز ميكانيكا الكم مفعمة بالمعضلات المفاهيمية والأحاجي الفلسفية. إلا أنه سيكون من اللطيف استكشاف ذلك، ثمة شيء هنا بالفعل كي نراه، حتى لو بدا العكس.

* * *

ملحق
فرضيات الواقعي ومسلَّمات ميكانيكا الكم

فرضيات الواقعي (الفصل الثاني والثالث)

فرضية الواقعي #١: لا يزال القمر هناك عندما لا ينظر أحدٌ إليه (أو يفكر فيه). يوجد ما يُسمَّى بالواقع الموضوعي.

فرضية الواقعي #٢: إذا كان في إمكانك رشُّها، إذن فهي واقعية. توجد الكيانات غير المرئية مثل الإلكترونات والفوتونات بالفعل.

فرضية الواقعي #٣: تمثِّل المفاهيم الأساسية التي تظهر في النظريات العلمية خواصَّ الأشياء الفيزيائية الفعلية وسلوكها. «المفهوم الأساسي» في ميكانيكا الكم هو الدالة الموجية.

فرضية الواقعي #٤: توفِّر النظريات العلمية تبصرًا وفهمًا، يُمكِّننا من القيام بأشياء، ربما ما كنَّا لنعتبرها ممكنة أو لنفكر في إمكانيتها من دونها. هذه هي الفرضية «الفاعلة»، عندما نقرر ما إذا كانت نظرية واقعية أو لا واقعية، أو ما إذا كان تفسير واقعيًّا أو لا واقعيًّا نسأل أنفسنا ما الذي تشجعنا أو يشجعنا على القيام به.

مسلَّمات ميكانيكا الكم (الفصل الرابع)

مسلَّمة #١: تحدِّد دالة نظام ميكانيكي كمي حالة هذا النظام بالكامل. إنها مسلَّمة «لا شيء هنا كي نراه»، تمتلك الدالة الموجية كل ما تحتاج إليه، لذلك لا تزعج نفسك بالبحث عن مستوى ما أعمق للواقع، يوجد من ورائها.

مسلَّمة #٢: تُمَثِّل فئة محددة من المؤثرات الرياضية الأشياء القابلة للقياس في ميكانيكا الكم. إنها مسلَّمة «مجموعة المفاتيح الصحيحة». من أجل الحصول على أشياء قابلة للرصد على غرار الزخم والطاقة، نحتاج إلى فتح الصندوق الذي تمثِّله الدالة الموجية. تتطلَّب الأشياء المختلفة القابلة للرصد مفاتيح مختلفة، تُسحَب من المجموعة الصحيحة.

مسلَّمة #٣: نحصل على القيمة المتوسطة للشيء القابل للرصد من خلال قيمة التوقُّع للمؤثر المقابل له. إنها مسلمة «افتح الصندوق». إنها الوصفة التي نستخدمها كي نجمع المؤثرات والدالة الموجية معًا، من أجل حساب قيم الأشياء القابلة للرصد.

مسلَّمة #٤: تُستقى احتمالية أن يسفر قياس عن نتيجة محددة من مربع الدالة الموجية المقابلة. إنها «قاعدة بورن» أو مسلمة «ما الذي قد نحصل عليه؟»، لا يخبرنا تطبيق قاعدة بورن على تراكب كمي ما الذي سوف نحصل عليه في القياس التالي.

مسلَّمة #٥: في نظامٍ مغلقٍ، لا تؤثِّر فيه مؤثرات خارجية، تتطور الدالة الموجية في الزمن وفق معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن. إنها مسلمة «كيف تنتقل من هنا إلى هناك». لاحظ أنه لا مكان هنا لهذا النوع من اللا اتصالية الذي نربطه بعملية القياس. وكما فهم فون نيومان الأمر، يدفعنا قبول هذه المسلمة إلى تبني مسلمة أبعد (إلا أنها على صلة بالأمر)، نفترض فيها أن الدالة الموجية تمثِّل تراكبًا للعديد من احتمالات القياس التي تنهار كي تعطي نتيجة مفردة.

شكر وعرفان

هجرتُ الحياة الأكاديمية منذ سنواتٍ عديدة، إلا أنه بعد قضاء ١٣ عامًا من الدراسة والتدريس وممارسة البحث العلمي في خمس جامعات مختلفة عبر العالم، أظن أن بعض العادات صارت متأصِّلة ولا تتبدل بسهولة. أحاول جاهدًا بقدر ما أستطيع دعوة متخصصين أكاديميين كي يقرأوا مادتي من أجل أن يعلقوا عليها، وذلك كي يبثُّوا الطمأنينة في قلبي عندما أكون مصيبًا وكي يردعوني عندما أكون مخطئًا.

وعلى ذلك فإنني أدين بالعرفان مرة أخرى لكارلو روفيللي من جامعة إيكس مارسيليا، إذ قرأ مخطوطة العمل الأوَّلي، وتبادل معي مراسلاتٍ ممتدة عبر البريد الإلكتروني حول ميكانيكا الكم العلائقية كما اضطلع بجانبٍ من زعزعة إيماني في واقعية أينشتاين. استفدتُ كذلك من تعليقات روبرت جريفيثس من جامعة كارنيجي ميلون بخصوص التواريخ المتسقة، ومن تعليقات كريستوفر فيوكس من جامعة ماساتشوستس ببوسطن بخصوص الكيوبيزمية، ومن تعليقات ماسيمو بيجليوتشي من كلية مدينة نيويورك، ومن تعليقات مكيلا ماسيمي من جامعة إدنبرة بخصوص فلسفة العلم (ومجازي الأساسي عن التنظير العلمي)، ومن تعليقات مايكل كوفارو من جامعة أونتاريو الغربية بخصوص معضلة الأساس المفضل في العوالم المتعددة، ومن تعليقات كل من هارفي

براون من جامعة أكسفورد وديفيد والاس من جامعة كاليفورنيا الجنوبية حول تفسير إيفرت، ومن تعليقات جيمس لاديمان من جامعة بريستول بخصوص الميتافيزيقا المُطَبَّعة. عليك أن تدرك من فضلك أن عرفاني بالجميل هنا لا ينبغي له أن يقودك إلى افتراض أن هؤلاء الرفاق الطيبين يتفقون مع أي مما كتبته حول هذه الموضوعات في هذا الكتاب أو حتى يتعاطفون نحوه، كما تقع أي أخطاء تتعلق بالتشوش أو سوء الفهم على عاتقي وحدي.

وبالطبع لم يكن أيٌّ من هذا ممكنًا لولا لاثا ميمون محررتي التي عانت طويلًا، وجيني نوجي، ولوسيا بيريز، وتشارلز لودر، وفريق الإنتاج في مطبعة جامعة أكسفورد، والفنان الأرجنتيني يوجينيا نوباتي، الذي رسم بشكلٍ جميلٍ مجازَ التنظير العلمي (شكل رقم ٧) وتنين ويلر الدخاني (شكل رقم ١٠)، وابني تيم الذي قدَّم لي الصور التوضيحية. سوف أظل ممتنًا لكل جهودهم إلى الأبد.

جيم باجوت

أكتوبر ٢٠١٩



الواقع الكمي



رحلة البحث عن المعنى الواقعي لميكانيكا الكم

لعبة النظريات

يصحبنا هذا الكتاب في رحلة مثيرة على متن سفينة العلم بين شواطئ الواقع التجريبي وشواطئ الواقع الميتافيزيقي.

يبدأ بعرض سريع لأهم مفاهيم ميكانيكا الكم التي تخالف البداهة الأولى ثم يعرج سريعا على فلسفات العلم التي حاولت وضع معيارا للتمييز بين العلم واللا علم وكيفية بناء النظرية العلمية. إلا أن هذا كله لا يعدو كونه مقدمة أساسية لهدف الكتاب الرئيسي شديد الأهمية. إذ يحاول الكتاب التساؤل عن حقيقة الواقع الذي نعيشه في ضوء إحدى أهم نظريات الفيزياء الحديثة "ميكانيكا الكم".

نبدأ بالمناظرة الشهيرة التي قامت يوما بين أينشتاين ونيلز بور وانتهت بانتصار تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم. ثم نواصل في تاريخ ممتد لتسعين عاما، حاولت فيه أبرع العقول فهم الدالة الموجية وحقيقة الواقع والطريقة التي نتمثله بها، نستكشف العديد من النظريات ومحاولات الفهم - ميكانيكا الكم العلائقية ونظرية المعلومات والاحتمالية الكمية والتواريخ المتسقة والمتغيرات الخفية المحلية والمتغيرات الخفية اللا محلية المُعَمَّاة والموجات الدليلية والوعي والعوالم المتعددة والكون المتعدد.

إنها حقا لعبة النظريات!


ISBN 978-977-765-34



